

我国煤层爆破增透技术研究进展及展望

刘泽功, 乔国栋, 刘 健, 高 魁

(安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽淮南 232001)

摘 要:煤层爆破增透技术为我国煤与瓦斯突出灾害的防治做出了巨大的贡献, 在增透机理和现场实践方面得到了广泛深入的研究。为了总结以往经验, 进一步提高新时代下深部煤层爆破增透技术水平, 分析了煤层爆破增透的机理, 建立了考虑动态抗压(拉)强度和理想爆轰条件下的爆破致裂煤岩体的数学模型, 反演了不同地应力工况下爆破孔壁及其周围应力分布状态, 阐述了我国煤层爆破增透技术的发展历程及研究进展, 总结了近几十年来出现的煤层爆破增透技术类型。我国在煤层爆破增透技术的增透机理、施工工艺等理论与实践方面取得了一系列创新成果, 解决了大量的理论及技术难题。然而, 随着我国煤炭开采向深部转移, 煤矿瓦斯地质条件日趋复杂, 对煤层爆破增透技术提出了新的要求。鉴于此, 提出了煤层爆破增透技术未来的发展趋势与展望。在深部构造区域煤层爆破增透方面, 应发展精准定向爆破增透技术, 精准增透的同时避免深部次生煤岩动力灾害的发生; 在松软低渗煤层增透方面, 应改变传统布孔工艺, 在顶底板岩层中施工爆破孔, 发展岩层爆破增透技术; 在智能化爆破增透方面, 应当结合人工智能、大数据分析手段, 在爆破方案智能设计、爆破效果智能考察方向进行深入研究, 从而进一步提高煤层爆破增透技术, 与我国安全、智能的煤炭开采发展方向相符合。

关键词:瓦斯治理; 爆破增透; 深孔预裂爆破; 聚能爆破; 顶板爆破增透; 煤层气

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)05-2453-24

Research progress and prospect of coal seam blasting antireflection technology in China

LIU Zegong, QIAO Guodong, LIU Jian, GAO Kui

(School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The permeability enhancement technology in coal seam blasting has made significant contributions to the prevention and control of coal and gas outburst disasters in China. Extensive and in-depth research has been conducted on both the permeability enhancement mechanism and practical applications. To summarize past experiences and further enhance the technology for deep coal seam blasting in the new era, this study analyzes the blasting permeability enhancement mechanism, establishes a mathematical model for blasting-induced fracturing of coal-rock masses considering dynamic compressive (tensile) strength and ideal detonation conditions, and inversely examines stress distribution around blasting holes under different geological stress conditions. The development history and research progress of China's coal seam blasting permeability enhancement technology are elucidated, and various types of technologies developed in recent

收稿日期: 2024-07-11 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0811

基金项目: 云南省重点研发计划资助项目(202303AA080014); 国家自然科学基金资助项目(52074013, 52374179)

作者简介: 刘泽功(1960—), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士生导师。E-mail: zgliu@aust.edu.cn

通讯作者: 乔国栋(1994—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生。E-mail: guodongqiao123@163.com

引用格式: 刘泽功, 乔国栋, 刘健, 等. 我国煤层爆破增透技术研究进展及展望[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2453-2476.

LIU Zegong, QIAO Guodong, LIU Jian, et al. Research progress and prospect of coal seam blasting antireflection technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2453-2476.



移动阅读

decades are summarized. Innovative achievements have been made in theories and practices concerning the permeability enhancement mechanism and construction processes of coal seam blasting in China, resolving numerous theoretical and technical challenges. However, as coal mining in China shifts to deeper areas and geological conditions of coal mines become increasingly complex, new requirements are imposed on coal seam blasting permeability enhancement technology. Therefore, future development trends and prospects of coal seam blasting permeability enhancement technology are proposed: in deep structural areas of coal seams, precise directional blasting technology should be developed to enhance permeability accurately while avoiding deep-seated secondary coal-rock dynamic disasters; for permeability enhancement in soft and low-permeability coal seams, traditional borehole layout techniques should be revised, and blasting holes should be constructed within roof and floor strata, promoting strata blasting permeability enhancement technology; in intelligent blasting permeability enhancement, integration with artificial intelligence and big data analysis methods should be pursued, focusing on intelligent design of blasting schemes and evaluation of blasting effects, thereby further advancing coal seam blasting permeability enhancement technology in alignment with China's direction towards safe and intelligent coal mining development.

Key words: gas governance; blasting increasing permeability; deep hole presplit blasting; accumulative blasting; roof blasting antireflection; coalbed methane

0 引 言

低碳背景下,我国一次能源消费中煤炭占比逐年下降。但由于我国化石燃料赋存呈现“缺油、少气、富煤”特征,煤炭在我国能源结构中仍扮演着重要角色。中国工程院在《中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究》中指出,煤炭仍将在中国的一次能源消费中占据主导地位^[1]。据统计,近20年来(2003—2023年),煤炭在一次能源生产和消费总量中的占比始终未低于50%^[2]。

瓦斯事故是煤矿生产过程中面临的最严重的安全事故之一。据统计,2008—2020年共发生煤矿安全事故1 085起,其中仅瓦斯事故占比就高达20%,死亡人数占比达33%^[3]。在众多的瓦斯事故中又以煤与瓦斯突出事故危害最大。2001—2022年期间,尽管煤与瓦斯突出事故总数及死亡人数逐年降低,但突出死亡人数的占比却始终保持在较高的水平。这表明煤矿安全形式虽整体向好,但煤与瓦斯突出事故在煤矿安全事故中仍然处于较高水平且愈发凸显^[4-6]。

为了强化煤与瓦斯突出治理工作,我国先后颁布了《防治煤与瓦斯突出细则》(1988年)、《防治煤与瓦斯突出细则》(1995年)、《防治煤与瓦斯突出规定》(2009年)、《防治煤与瓦斯突出细则》(2019年),煤与瓦斯突出事故得到了有效遏制,但仍然无法彻底消除。目前解决煤与瓦斯突出问题的措施主要分为区域性措施和局部措施2大类^[7]。在对煤层群进行开采时,保护层开采技术的区域防突措施效果显著^[8]。然而,对于首采煤层或者无保护层可采的单一煤层而言则需要对煤层进行改造以提高其透气性^[9]。为了增加煤

层透气性、提高瓦斯抽采效率,研究人员开发了多种煤层增透技术,如水力压裂^[10-12],水力掏槽^[13],水力冲孔^[14],爆破增透^[15],高压电脉冲增透^[16],超声波增透^[17-18],微波增透^[19],注气驱替^[20-21],酸处理^[22],溶剂萃取^[23]等技术。这些煤层增透技术在工程应用中均取得了较好的效果,为瓦斯治理水平的提高做出了巨大贡献。其中爆破增透技术由于组织时间短、增透效果好等优势在工程现场中得到了广泛应用,为我国煤层消突、瓦斯治理做出了巨大贡献。近年来,随着钻孔装备、爆破器材、封孔材料的高速发展,爆破增透工艺快速迭代,细分种类的爆破增透技术逐渐演化分离。然而,目前这些爆破增透技术没有得到较为系统的梳理、归纳。此外,随着我国煤炭开采深度逐年增加,煤矿面临“三高一扰动”问题,在高地应力环境下爆炸能量的释放、传递、衰减相较于低应力环境存在较大的区别^[24],适用于高地应力环境的爆破增透技术亟待发展。基于此,笔者分析了爆破增透煤层机理,梳理了煤层爆破增透技术的发展历程,阐述了煤层爆破增透技术取得的进展,提出了未来煤层爆破增透技术的发展方向。

1 煤层爆破增透机理研究

对于煤层爆破增透强化瓦斯抽采技术而言,其本质是利用炸药爆炸做功致裂煤层,提高煤层透气性,从而促进瓦斯高效抽采。炸药起爆后,应力波、爆生气体及高温都会对煤层中爆生裂纹的扩展产生影响。在工程上,爆破致裂半径决定了炮孔布置参数,进而影响施工成本,而爆破裂纹的密集程度又对煤层渗透性的改善至关重要。此外,对于深孔控制预裂爆破而

言,控制孔能够起到补偿位移空间以及延长爆生裂纹长度的作用,因此控制孔也是影响爆破增透效果的一项重要因素。

1.1 爆破致裂煤层理论

根据爆炸力学相关知识,炸药爆炸后会首先在钻孔附近产生冲击波。冲击波是一种强间断波,其作用区域的介质在径向和环向上均处于受压状态。由于冲击波的强度远大于煤层动态抗压强度,这导致其作用范围内的介质表现为类流体特征^[25]。冲击波作用范围内的煤体成粉碎颗粒状,该区域通常被称为粉碎区或爆破近区。随着爆心距增加,冲击波逐渐衰减为应力波,应力波作用范围内的煤层会出现塑性变形,应力波拉伸分量导致煤层出现径向裂纹^[26]。应力波作用的区域被称为裂隙区或爆破中区,密集的爆生裂纹提高了煤层的透气性并为瓦斯的运移提供通道,该区域是提高瓦斯抽采的有效区域。随着传播距离的增加,应力波进一步衰减为弹性地震波,弹性地震波作用区域内的介质主要发生弹性振动^[27],对煤层透气性的改善影响较小。爆炸应力波的作用区域和衰减情况如图 1 所示。

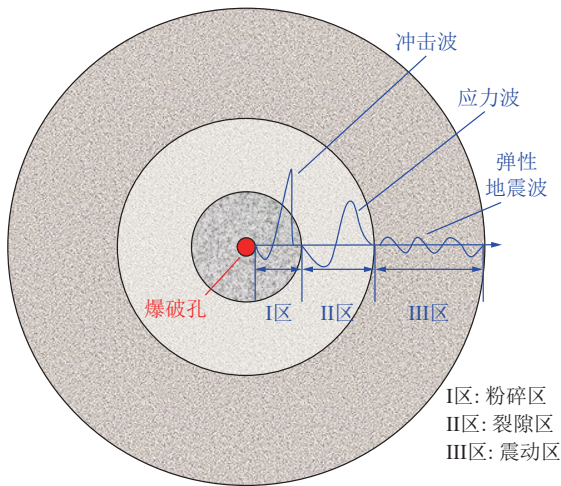


图 1 应力波衰减及作用区域

Fig.1 Stress wave attenuation pattern and region of action

对于爆破致裂煤层机制而言,除了应力波作用以外,爆生气体也是致裂煤层的一个重要因素,这一观点已经达成了广泛的共识^[28]。在煤层爆破增透过程中,煤层受到应力波的动态载荷和爆生气体较长时间的准静态载荷^[29-30]。然而,目前对于应力波和爆生气体二者哪一个因素在裂纹扩展中扮演更重要的角色一直存在争议^[31-32]。笔者认为爆生气体和应力波在爆炸发生后的不同阶段对裂纹扩展的贡献存在差别。具体而言,在爆炸发生后,钻孔周围产生的爆炸冲击波传播速度很快,其强度远大于煤体动态抗压强度,

会在钻孔壁周围产生初始裂隙,这个阶段应力波起主导作用。而随着时间推移,爆生气体压入初始裂隙,导致裂隙进一步的扩展,这个阶段爆生气体的贡献则更大。

除了上述 2 种因素以外,一些研究还认为高温同样会对裂纹扩展产生影响。WAN 等^[33]研究表明:爆生气体会随着冲击波进入裂纹,并继续推动裂纹扩展^[34],从而对介质产生 3 种不同的影响。首先,爆生气体在通过粉碎区时引起岩石颗粒的位移和剥落。其次,爆生气体进一步促进了裂纹的扩展。最后,爆生气体的高温渗透到裂纹中,迅速提高了周围介质的温度。这导致了介质的变形和额外裂纹的形成,同时提高储层渗透率及导电性^[35]。3 种因素对裂纹扩展贡献如图 2 所示。

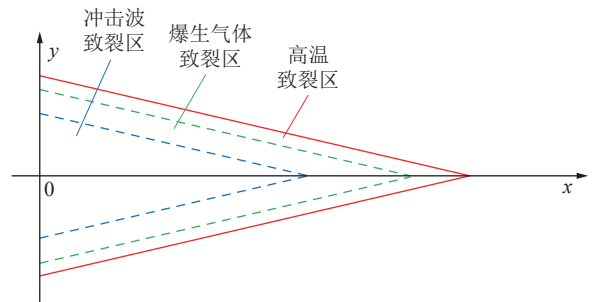


图 2 裂纹扩展示意^[33]

Fig.2 Crack expansion schematic^[33]

1.2 爆破致裂范围的定量评估

通常来说,粉碎区内的煤岩体呈细小的粉末颗粒状,如果利用爆破孔作为瓦斯抽采孔,细小的粉末颗粒可能会堵塞裂纹,阻碍瓦斯抽采。另一方面,爆破粉碎区会消耗大量的爆炸能量^[36]。根据能量守恒定理,粉碎区越大,能量消耗越多,裂隙区内用于致裂煤层的爆炸能量越少。而裂隙区的宏观裂纹是提高煤层透气性的主控因素,因此有必要对粉碎区和裂隙区的范围进行定量评估。

煤体具有抗拉不抗压的性质,其动态力学性质与岩体类似。目前,学者们开发了多种模型用来评估爆破导致的岩石的粉碎程度以及造成的粉碎区半径。这些方法多利用半经验公式评估破碎区范围。

IL'YUSHIN^[37]通过假设具有黏聚性的各向同性不可压缩颗粒介质模型来描述岩石这类脆性材料在粉碎区的行为。此时,粉碎区半径 r_1 可以表示为

$$\begin{cases} r_1 = r_0 \left\{ \frac{P_r}{-(k/f) + [f_c + (k/f)]L^{2f/(1+f)}} \right\}^{1/2f} \sqrt{L} \\ L = \frac{E/(1+\mu)}{f_c [1 + \ln(f_c/f_i)]} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_1 为粉碎区半径,mm; r_0 为钻孔半径,mm; P_r 为

钻孔压力, Pa; γ 为炸药绝热膨胀常数; k 为黏聚力, Pa; f 为内摩擦因数; f_c 为煤岩的单轴抗压强度, Pa; f_t 为抗拉强度, Pa; E 为弹性模量, Pa; μ 为泊松比。

需要说明的是, 该模型仅限于主要破坏模式为压缩的情况, 并且更适用于高强度岩石条件。煤体的强度通常较小, 以往的研究表明^[38], 对于强度较小岩石, 该模型会高估破碎程度。

SZULADZINSKI^[39]用瞬态动力分析方法模拟了爆破孔附近的破碎和开裂。粉碎区半径 r_1 的关系式为

$$r_1 = \sqrt{\frac{2r_0\rho_0Q_{ef}}{f'_c}} \quad (2)$$

式中: ρ_0 为炸药密度, g/mm^3 ; Q_{ef} 为炸药有效能量, Nmm/g ; f'_c 为煤岩的单轴动抗压强度, MPa 。

DJORDJEVIC^[40]基于 Griffith 破坏准则对粉碎区半径进行建模:

$$r_1 = \frac{r_0}{\sqrt{24f_t/P_r}} \quad (3)$$

KANCHIBOTLA 等^[41]使用爆轰压力单轴抗压强度对粉碎区半径进行建模:

$$r_1 = r_0 \sqrt{\frac{P_d}{f'_c}} \quad (4)$$

式中: P_d 为爆轰压力, Pa。

由于粉碎区半径很少被测量, 上述模型缺少相应的工程验证。此外, 爆破载荷作用下的煤岩会出现典型动态响应, 而上述一些数学模型中多以静态抗压、抗拉强度为输入变量, 计算结果准确度较差。鉴于此, 提出一种考虑理想爆轰理论和动态抗压(拉)强度的粉碎区(裂隙区)计算方法。

根据前文, 粉碎圈的形成与冲击波有关。由于冲击波产生的径向压力远大于煤体的动态抗压强度, 煤体出现压剪破坏, 从而形成粉碎区。粉碎区内的冲击波的径向峰值压力 σ_r 与煤的动态单轴抗压强度 f'_c 满足下式^[42]:

$$\sigma_r \geq f'_c \quad (5)$$

GAO 等^[43]指出, 在爆破近区, 动态抗压强度约为静态抗压强度的 10 倍, 即 $f'_c = 10f_c$ 。

冲击波在传播过程中不断压缩煤体, 能量和峰值压力不断衰减。在距离爆源中心 r 处的径向峰值应力 σ_r 可由式(6)表示^[44]:

$$\sigma_r = P_r \left(\frac{r_0}{r} \right)^v \quad (6)$$

式中: v 为应力衰减指数, $v = 2 \pm \mu/(1 - \mu)$ 。当径向峰值

应力由冲击波引起时, 等式右侧取正号, 文献^[45]取 $\mu = 0.5$, $v = 3$ 。当径向峰值应力由应力波引起时, 等式右侧取负号。

在粉碎区边缘处, 冲击波峰值压力与煤动态抗压强度大小相等。联立式(5)和式(6), 得到粉碎圈半径 r_1 的计算公式:

$$r_1 = \left(\frac{P_r}{f'_c} \right)^{1/v} r_0 \quad (7)$$

裂隙区在应力波的作用下产生。应力波影响范围内的煤体在径向出现断裂, 形成裂隙区。煤体对拉伸破坏的敏感度远大于压缩破坏。煤的径向断裂主要由应力波的拉伸分量造成。因此应力波的环向应力峰值与煤的抗拉强度决定了裂隙区的范围。在裂隙区内, 二者关系满足下式:

$$\sigma_\theta \geq f'_t \quad (8)$$

文献^[44]指出, 动态抗拉强度随应变率的变化很小, 取 $f_t = f'_t$ 。

环向峰值应力 σ_θ 与径向峰值应力存在如下关系:

$$\sigma_\theta = \lambda\sigma_r \quad (9)$$

式中: λ 为侧向应力系数, $\lambda = \mu/(1 - \mu)$ 。联立式(6)、式(9)可得环向应力峰值随爆心距衰减函数:

$$\sigma_\theta = \lambda\sigma_r = \lambda P_r \left(\frac{r_0}{r} \right)^v \quad (10)$$

在裂隙区的边缘, 应力波的切向峰值拉应力与煤的动态抗拉强度相等。联立式(8)和式(10), 可得裂隙区半径 r_2 的计算公式:

$$r_2 = \left(\frac{\lambda P_r}{f'_t} \right)^{1/v} r_0 \quad (11)$$

式(7)和式(11)中, 除了 P_r 外, 其他参数均易获取。使用理想爆轰理论确定爆破孔孔壁压力。理想爆轰理论假设在炸药化学反应完成后产生了平面爆轰前缘跳跃不连续的一维激波, 这种跳变不连续与时间无关。理想爆轰判据要求有一个稳定解, 即 CJ 点。CJ 爆轰压力^[46]可表示为

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 D_{CJ}^2}{\gamma + 1} \quad (12)$$

式中: P_{CJ} 为 CJ 爆轰压力, Pa; D_{CJ} 为炸药爆速, m/s ; ρ_0 为炸药密度, kg/m^3 ; γ 为比热比, 取值为 3。

PERSSON 等^[46]认为 P_r 可以表示为

$$P_r = \frac{P_{CJ}}{2} \quad (13)$$

联立式(7)、式(11)、式(12)和式(13)可以得到

爆破载荷作用下煤层粉碎区和裂隙区半径数学模型:

$$\begin{cases} r_1 = \left[\frac{\rho_0 D_{Cl}^2}{2f'_c(\gamma+1)} \right]^{1/\nu} r_0 & (\text{粉碎区半径}) \\ r_2 = \left[\frac{\lambda \rho_0 D_{Cl}^2}{2f'_t(\gamma+1)} \right]^{1/\nu} r_0 & (\text{裂隙区半径}) \end{cases} \quad (14)$$

式 (14) 中的参数均易获得, 可为工程现场中爆破孔参数设置提供理论指导。

1.3 控制孔作用机理

在爆炸应力波载荷作用下, 控制孔会产生复杂的动态响应。研究表明, 当控制孔距离爆破孔足够远时, 可将爆炸应力波视为平面波^[27]。郭德勇等^[47]根据平面应力波的斜入射理论, 以控制中心为原点, 以控制孔孔壁上任意一点 $P(x,y)$ 为研究对象, 绘制了纵波入射控制孔在控制孔壁上发生反射的示意图, 如图 3 所示。

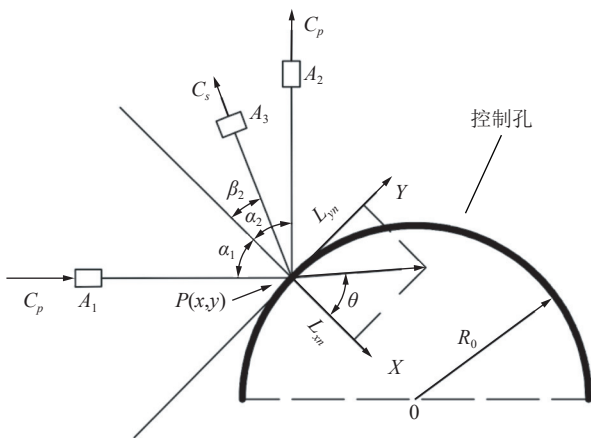


图 3 平面波对控制孔的作用机制^[47]

Fig.3 Mechanism of plane wave action on control hole^[47]

图 3 中, 入射纵波 C_p 在质点 $P(x,y)$ 处发生反射, 形成反射纵波和反射横波。根据 Snell 定律, 入射夹角 α_1 和反射纵波夹角 α_2 相等, 而反射横波夹角 β_2 可以由下式表示:

$$\beta_2 = \arcsin \left[\frac{\sin \alpha_1}{\sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}} \right] \quad (15)$$

式中: μ 为介质泊松比。

入、反射波振幅之间存在以下关系:

$$\begin{cases} A_2 = \frac{\tan \beta_2 \tan^2(2\beta_2) - \tan \alpha_1}{\tan \beta_2 \tan^2(2\beta_2) + \tan \alpha_1} A_1 \\ A_3 = A_1 \left[\frac{\tan \beta_2 \tan^2(2\beta_2) - \tan \alpha_1}{\tan \beta_2 \tan^2(2\beta_2) + \tan \alpha_1} + 1 \right] \cot(2\beta_2) \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 分别为入射纵波振幅、反射纵波振幅、反射横波振幅; $\frac{\tan \beta_2 \tan^2(2\beta_2) - \tan \alpha_1}{\tan \beta_2 \tan^2(2\beta_2) + \tan \alpha_1}$ 为反射系数。

李会良等^[48]理论分析表明, 控制孔会从根本上改变周围介质的受力状态, 即由于反射应力波的应力叠加作用, 控制孔壁上会出现拉应力集中现象。原因有 2 个: ① 控制孔壁做为一个自由面, 可产生较大的拉应力; ② 控制孔壁是一个曲面, 应力波在曲面上发生反射时会产生速度差, 进而在控制孔壁上产生拉伸应力。由于煤岩介质不抗拉的特性, 控制孔壁上的应力集中点会出现断裂。断裂形成后, 在断裂尖端将产生新的应力集中, 而控制孔壁其余地方则出现动力松弛现象, 如图 4 所示。

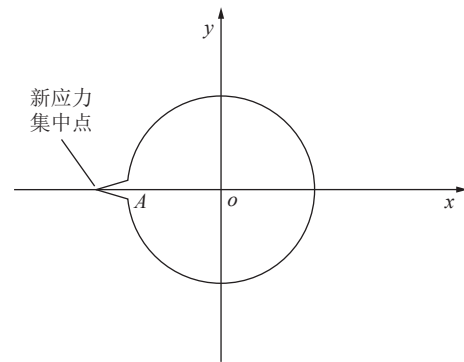


图 4 控制孔开裂示意

Fig.4 Control hole cracking

赵杰超^[49]认为控制孔附近的煤岩介质受到入射压缩波、反射拉伸波和反射横波的共同作用, 任意质点处的应力受三者叠加控制, 如图 5a 所示。图 5a 中质点 M 的拉伸主应力达到最大值时, σ_1 、 σ_2 的方向如图 5b 所示。在最小抵抗线上, σ_1 平行于控制孔径向, σ_2 则垂直于控制孔径向。随着远离最小抵抗线, σ_1 和 σ_2 的方向均发生偏转, 如图 5b 所示。当 σ_1 大于煤体最大抗拉强度时, 控制孔附近将出现环向裂纹。当 σ_2 大于煤体最大抗拉强度时, 控制孔附近将出现径向裂纹。总的来说, 目前对于控制孔作用的认知存在一个共识, 即控制孔对爆破裂纹具有导向和加速扩展的作用, 此外, 控制孔还能起到增加辅助自由面扩大爆破裂隙区的作用。

1.4 地应力作用机理

随着煤矿开采强度不断增加, 部分矿区浅部煤炭资源日趋枯竭, 煤炭开采深度正以每年 8~12 m 的速度增加, 部分矿区达 10~25 m, 我国煤矿已逐步进入深部开采阶段。深部矿区煤层开采面临高地应力影响, 对煤层进行爆破增透时地应力因素不可忽略。YI 等^[50]认为在对地应力环境下的岩石爆破问题进行理论分析时, 可将动静载耦合作用模型分解为地应力静态加载模型和爆破动态载荷模型 2 类来分析。后续研究也多沿用这一思路^[51-52], 动静载耦合模型分解如图 6 所示。

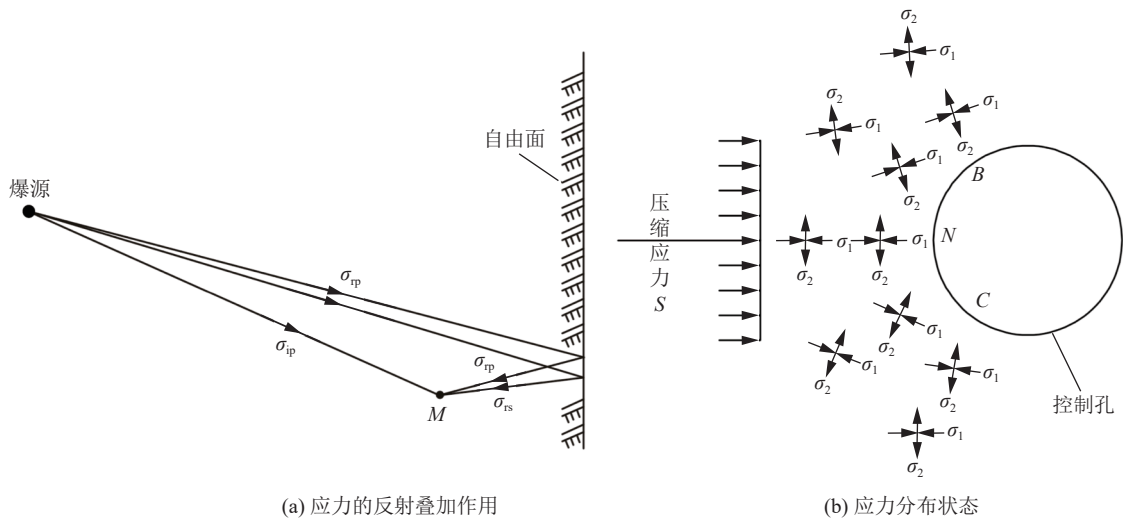


图 5 控制孔附近质点应力状态^[49]

Fig.5 Stress state of the mass in the vicinity of the control hole^[49]

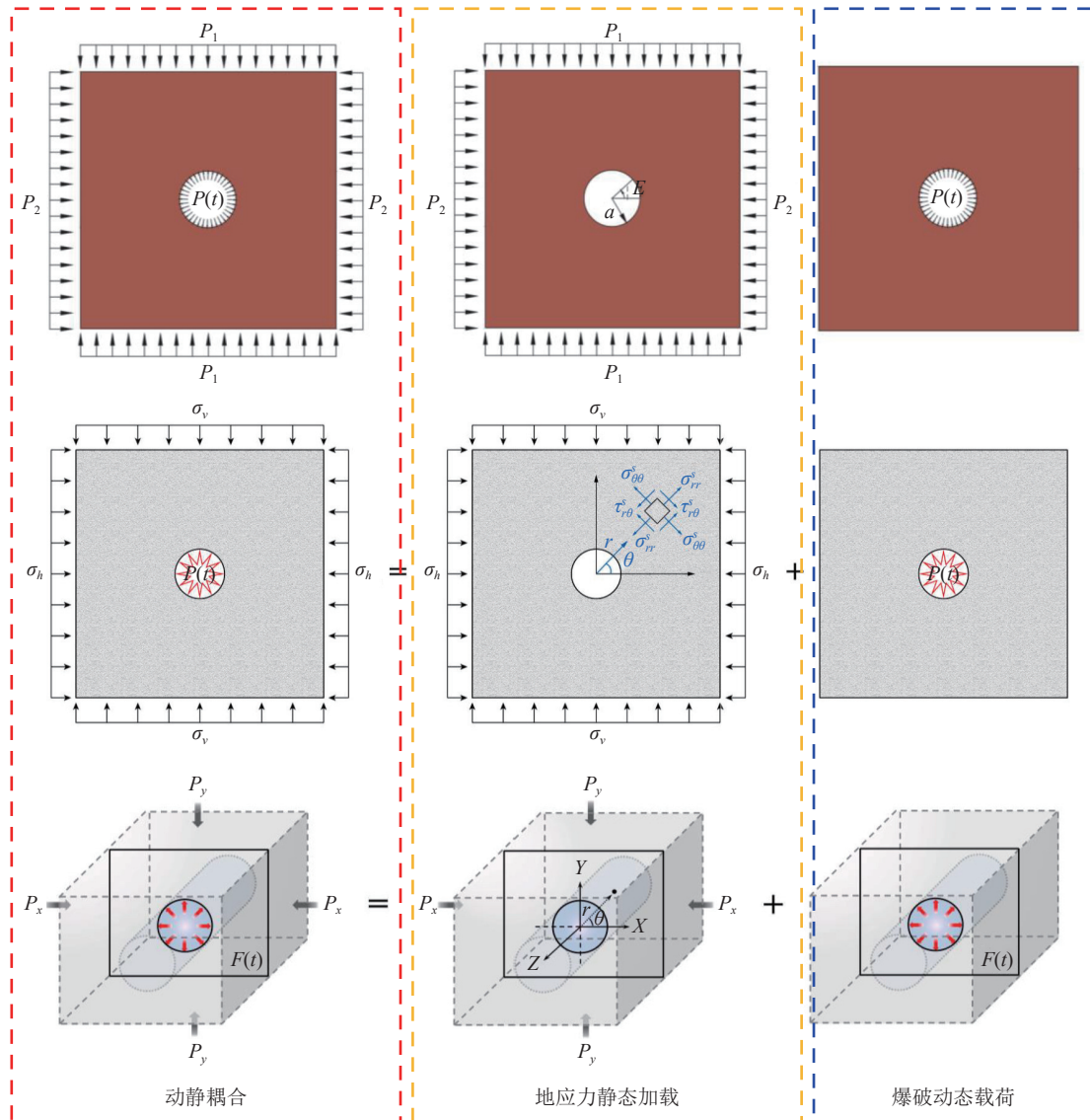


图 6 理论分析几何图形^[50-52]

Fig.6 Geometric models for theoretical analysis^[50-52]

目前,对于地应力载荷作用下模型的理论分析通常采用平面应变理论。平面应变问题是平面问题的一类,当工程结构在 1 个方向上(如长度方向)比其他 2 个方向大得多且横截面的形状和尺寸沿长度方向没有明显变化时,可将该结构简化为平面应变模型。对于煤层爆破增透而言,爆破孔长达几十至上百米,而

直径通常为几十毫米,符合平面应变简化条件。

地应力加载模式下将平面应变模型视为一个包含有圆孔的无限板。板在水平和垂直方向分别受到大小为 P_x 和 P_y 的双轴应力,孔的半径为 a 。对双轴应力加载下爆破孔周围产生的环向应力进行分析,可得应力分布的完整解^[53]:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{2} \left\{ (P_y + P_x) \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] + (P_x - P_y) \left[1 - 4 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right] \cos 2\theta \right\} \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} \left\{ (P_y + P_x) \left[1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] - (P_x - P_y) \left[1 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right] \cos 2\theta \right\} \\ \tau_{r\theta} = \frac{1}{2} (P_y - P_x) \left[1 + 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right] \sin 2\theta \end{cases} \quad (17)$$

式中: σ_{rr} 为径向应力, MPa; $\sigma_{\theta\theta}$ 为环向应力, MPa; $\tau_{r\theta}$ 为剪应力, MPa; r 为距爆源的距离, m; θ 为距爆源的角度, rad。

根据式 (17), 当 $r = a$ 时, σ_{rr} 和 $\tau_{r\theta}$ 的大小为 0。此时, 炮孔壁上的环向应力分布可以代表炮孔整体的应

力分布状态。根据式 (17) 对不同地应力加载模式下的爆破孔孔壁上的应力分布状态进行反演, 如图 7a、图 7b 所示。通过改变爆心距大小, 对不同爆心距下的应力分布情况进行反演, 如图 7c、图 7d 所示。

从图 7a、图 7c 中可以看出, 在各相同性地应力条

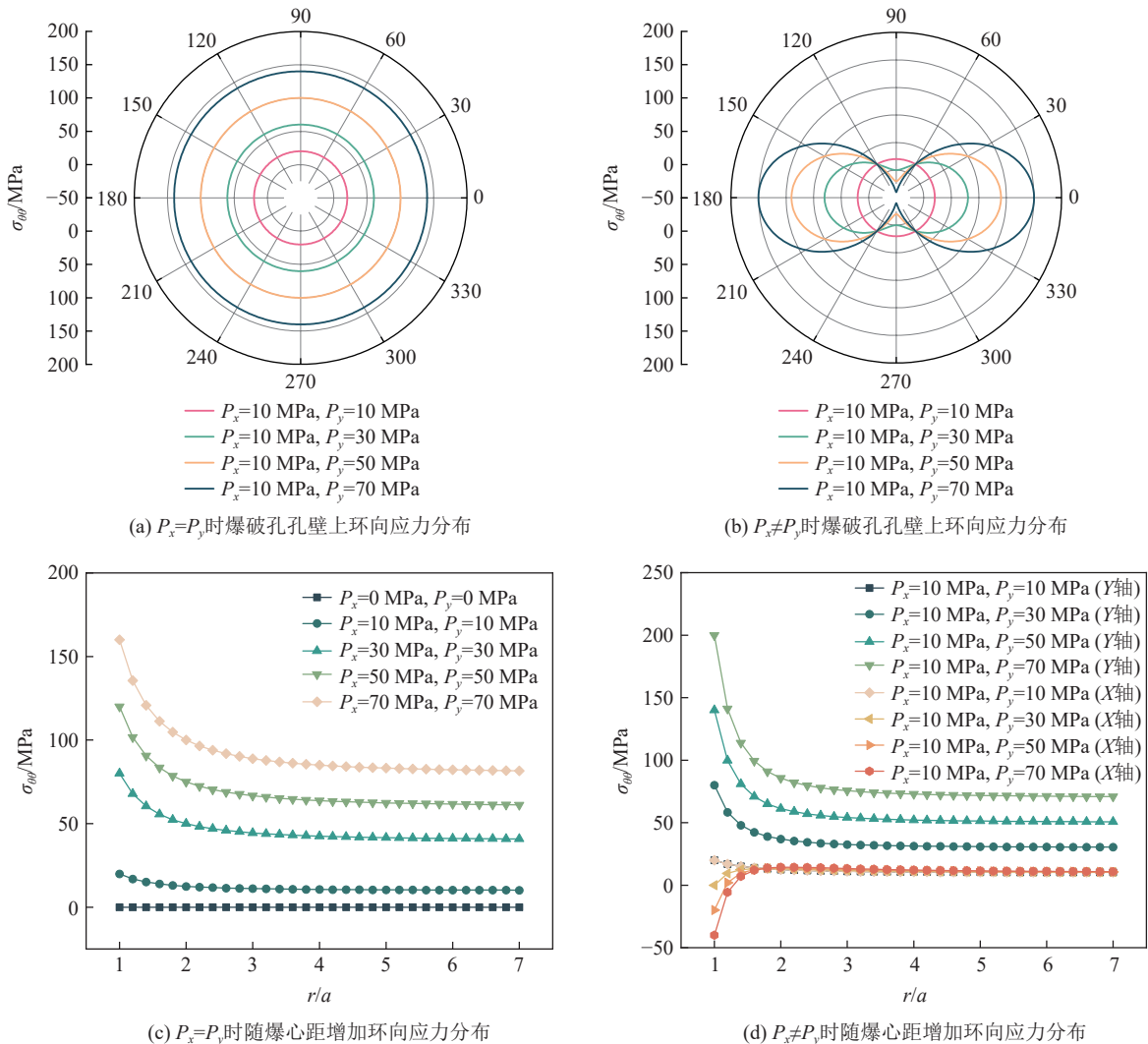


图 7 不同地应力下爆破孔壁和远端应力分布

Fig.7 Stress distribution in the blast hole wall and distal end under different in situ stresses

件下 ($P_x = P_y$), 爆破孔壁在各方向上受大小相同的环向压应力, 且随着地应力增加而增加。随着爆心距变大, 环向应力逐渐衰减至地应力大小 ($\sigma_{\theta\theta} = P_x = P_y$)。从图 7b、图 7d 中可以看出, 在各相异性地应力条件下 ($P_x \neq P_y$), 爆破孔壁的环向应力在最大主应力方向上表现为拉应力, 在最小主应力方向上出现最大压应力。随着爆心距增加, X 轴方向上的环向应力逐渐趋近于 P_y ($\sigma_{\theta\theta} = P_y$), Y 轴方向上的环向应力逐渐趋近于 P_x ($\sigma_{\theta\theta} = P_x$)。这意味着各向同性地应力条件下, 爆破裂纹在各个方向上都受到抑制; 各向异性地应力条件下, 爆破裂纹在最小主应力方向上受到抑制, 在最大主应力方向上被促进。这与以往的数值模拟研究结论一致。TAO 等^[51]使用 ANSYS/LS-DYNA 对地应力加载作用下岩石爆破进行仿真, 结果表明: 随着岩石压力的升高, 粉碎区收缩。在各向异性应力场中, 粉碎区呈椭圆形, 随着地应力各向异性增大, 裂缝在最大主应力分布密度增加。张鑫等^[54]对地应力载荷作用下的爆破裂纹扩展进行了相似模拟试验和数值模拟研究, 结果表明, 爆生裂纹区域呈椭圆形, 最大主应力方向裂纹较密集。QIAO 等^[26]利用图像处理技术对仿真结果进行定量分析, 引入损伤变量 η (η 为损伤面积占模型面积的百分比) 对爆破损伤结果进行表征, 结果表明: 在各向同性地应力场中, 爆炸损伤的演化始终受到抑制, 在各向异性应力场中, 损伤变量在最大主应力方向上得到促进, 不同地应力条件下损伤变量随时间演化情况如图 8 所示。

XIE 等^[55], MA 等^[56], LI 等^[57]也得到了与上述研究相同的结论。不同地应力加载下的爆破仿真结果如图 9 所示。

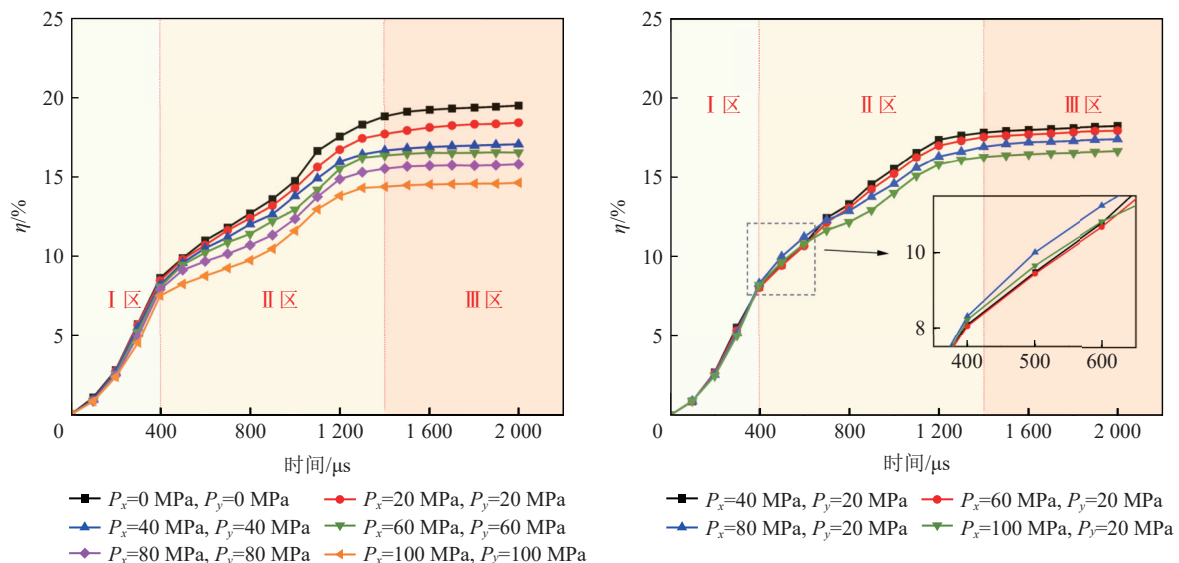


图 8 不同地应力加载下损伤变量演化^[26]

Fig. 8 Evolution of damage variables under different in situ stresses^[26]

2 爆破增透技术的发展历程

爆破技术在防治煤层瓦斯突出方面的应用有着较久的历史。19 世纪时爆破技术就开始被用于防治瓦斯突出, 然而当时对于震动放炮对煤与瓦斯突出的影响具有不一致的看法。具体而言, 在有些情况下震动放炮可以导致延迟性突出, 但有时也能取得较好的防突效果。桥本清等日本学者也认为爆破会诱导煤与瓦斯突出, 而匈牙利和澳大利亚的一些学者则主张在放炮时应尽可能大的引发煤层震动^[58]。早期, 爆破震动技术主要用于煤巷掘进和石门揭煤, 并不能作为严格意义上的煤层防突措施。但在巷道掘进过程中, 工程技术人员已经开始对爆破震动后的煤层应力、形变等参数进行考察, 尝试建立煤层突出与爆破震动之间的联系。前苏联马可耶夫科学研究院对顿巴斯的捷列卓夫卡矿井进行爆破震动掘进, 研究表明: ① 天然煤层的透气系数, 不仅沿走向有变化而且沿倾向也有变化; ② 煤层受破坏最严重的部分透气系数最大; ③ 在透气系数急剧变化的地点, 大多数情况下也容易发生瓦斯突出。此外, 使用震动放炮掘进巷道时, 观测得知工作面前存在破裂带、压缩带和原始煤体带, 这为预测放炮后的瓦斯突出提供了理论^[58]。

1890 年前, 法国首先使用震动放炮技术诱导突出的发生。1920 年以后, 放炮诱导突出的方法在欧洲得到了广泛的应用, 并逐渐改进和完善, 称之为法国法和德国法 2 种方法。爆破震动法在当时的西欧成为了预防瓦斯突出最常使用的方法^[59]。1933 年, 前苏联开始使用震动放炮技术防治瓦斯突出, 截至 1951 年, 已有 12 个煤层使用了该技术。1956—1958 年, 前苏

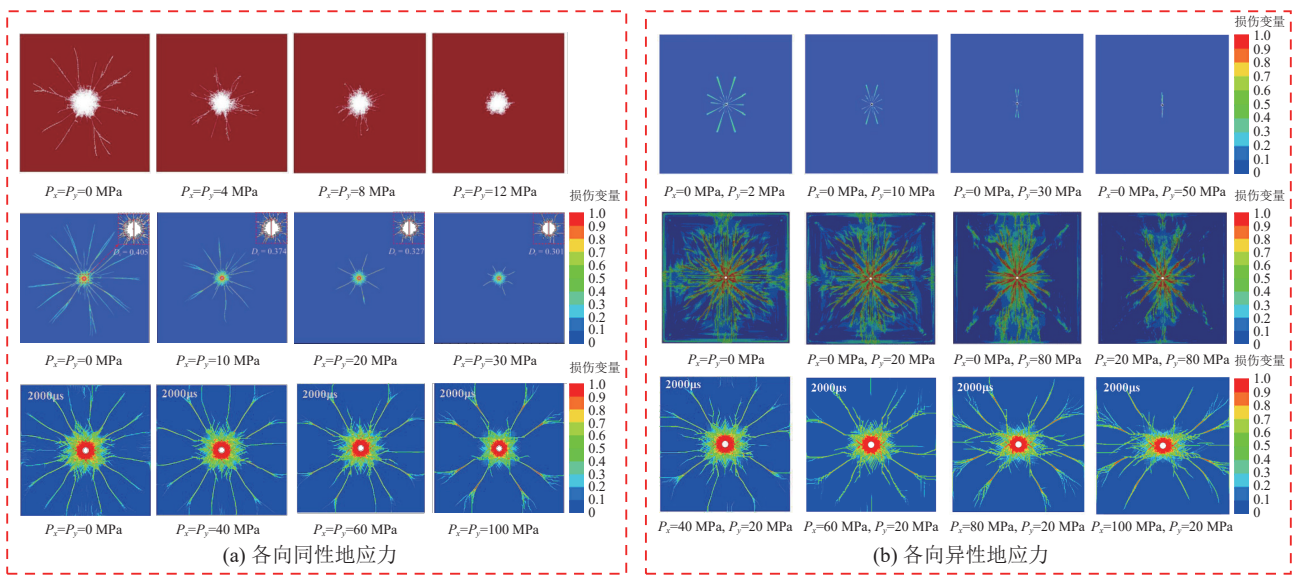


图 9 不同地应力加载下爆破裂纹分布^[26, 51-52, 55-56]

Fig.9 Distribution of blast cracks under different in-situ stress loadings^[26, 51-52, 55-56]

联卡拉干煤矿开展了 2 次煤层爆破试验, 试验目的是考察爆破后煤层透气性系数和瓦斯抽采量的变化, 取得了较好的效果^[60]。20 世纪 60 年代初期, 前苏联开始在松软煤层中使用小孔径的水封震动爆破, 结果发现这种方法能在一定程度上起到大直径钻孔的作用, 但该技术并未得到推广应用。后来, 在此基础上, 开发出了深孔爆破技术, 即在工作面上再增加 2 个炮孔, 同时起爆, 从而破坏煤层的完整性, 然而该技术在当时也未得到广泛的使用^[59]。

20 世纪 60 年代到 70 年代, 深孔松动爆破技术被应用于我国煤矿生产。重庆煤炭科学研究所^[61]对深孔松动爆破技术的工作原理阐述为: 通过多打炮孔, 多装药, 使用深孔放炮的方式改变煤层应力状态, 增加煤体的破碎程度和透气性, 降低煤层突出危险性。1966—1970 年, 北票矿务局和红卫煤矿均将深孔松动爆破技术应用于煤矿生产, 结果表明, 深孔松动爆破对于坚硬煤层的防突具有一定效果^[61]。到 1989 年, 深孔松动爆破技术已经在全国 28 个矿井进行了推广应用^[62]。陈锐^[62]研究表明, 尽管深孔松动爆破有诱发瓦斯突出的风险, 但在爆破施工参数与施工工艺合理的情况下, 深孔松动爆破可以很好地起到防治瓦斯突出的风险。瞿涛宝^[63]对松动爆破预防瓦斯突出的效果进行了分析, 并对一些松动爆破防突的布孔方式进行了总结, 如图 10 所示。

白赞成^[64], 李济堂^[65]对深孔松动爆破的防突机理、施工工艺等进行研究和总结, 认为深孔松动爆破技术能够改善煤层地应力、增加突出阻力, 从而预防煤与瓦斯突出事故发生。具体来说, 在爆破后应力集中区向煤层深部转移, 在工作面前方会形成较长的卸压区,

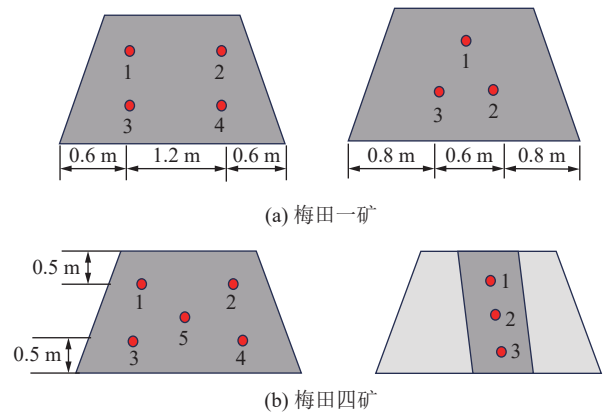


图 10 梅田局一矿、四矿深孔松动爆破炮孔布置^[63]

Fig.10 Arrangement of deep-hole loose blasting holes at Meitian Board's Mines 1 and 4^[63]

从而达到预防煤层突出的目的。深孔松动爆破前后煤层应力变化情况如图 11 所示。

除松动爆破技术以外, 深孔控制爆破防突技术也得到了研究。与松动爆破技术不同的是, 深孔控制爆破卸压技术在爆破孔附近布置了控制孔提高爆破卸压的效果。1990—1991 年, 李会良等^[48], 邢昭芳等^[66]对控制爆破的布孔参数和控制孔作用理论进行研究。1995 年, 林柏泉^[67]利用相似理论和爆炸力学等相关知识开展了控制卸压爆破防突试验, 结果表明: 较大范围的卸压区是该技术在防突方面取得效果的主要原因。此后, 罗勇等^[68], 赵友宝等^[69]众多学者通过理论分析、数值模拟等研究方法对深孔控制爆破卸压防突技术进行了深入研究, 为工程现场提供了指导。

上述研究中, 无论是松动爆破技术还是深孔控制卸压爆破技术多用于煤巷掘进工作面, 且其主要目的

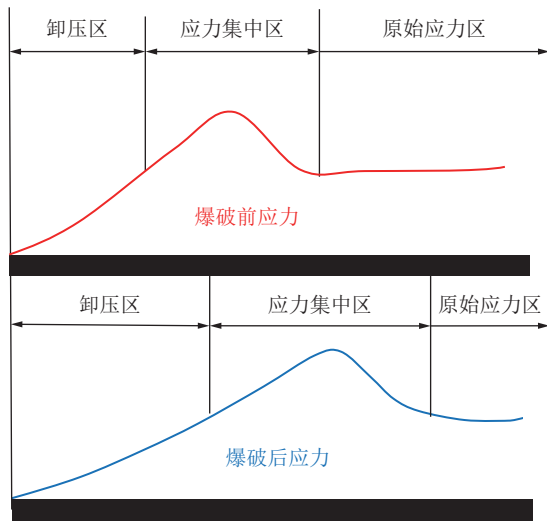


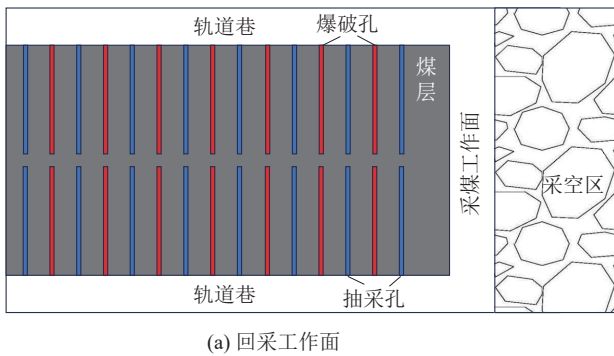
图 11 松动爆破前后应力变化情况^[64]

Fig.11 Stress changes in the palm face before and after loose blasting^[64]

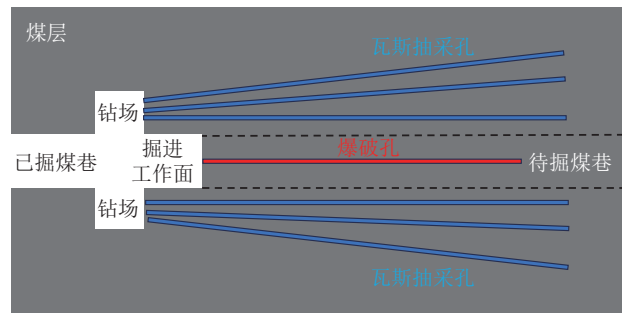
是改变工作面应力状态,使卸压区边界向深部转移,从而防止工作面发生突出。这个过程中,煤层透气性系数的提高更多的是一种附加产物。对于系统性的使用爆破技术提高煤层透气性从而增加瓦斯抽放效率的研究并不多见。刘泽功^[70]提到使用水力压裂和爆破技术促进抽放。王佰顺等^[71],宋贤生等^[72]将深孔松动爆破技术与钻孔瓦斯抽放技术相结合,在淮南矿

业集团潘一矿 C13-1 煤层开展了现场试验,结果表明,该技术能够提高瓦斯抽放效率,增加工作面的瓦斯涌出量。戴广龙等^[73]通过数值模拟的研究方法进一步对松动爆破卸压增透技术进行了研究,研究表明松动爆破能够提高钻孔周围煤体的透气性。这些研究中多使用松动爆破技术对煤层进行改造,尽管其主要目的仍是对掘进工作面进行卸压,但已经开始考虑爆破对瓦斯抽放效率的影响。然而由于煤层中自由面的缺失,松动爆破技术对煤层的增透效果有限。

鉴于此,安徽理工大学的刘泽功教授主持了“十五”“十一五”国家重点科技攻关项目,项目旨在使用深孔预裂爆破技术和深孔预裂控制爆破技术提高低渗煤层的透气性,进而提高瓦斯抽放效率,研究团队发明了一种新型煤矿瓦斯抽采爆破药柱^[74],专门用于高瓦斯低渗煤层预裂控制爆破增透高效抽采瓦斯技术,具有爆破威力大,孔内易装药,传爆距离长等性能,这种新爆破器材的成功研制,进一步推动了煤矿深孔控制爆破技术的创新发展。深孔控制预裂爆破强化瓦斯抽采技术一般在回采工作面的运输巷和回风巷内平行于工作面施工 50 m 以上的钻孔,交错布置炮孔和抽采孔;或是在掘进工作面施工 40~50 m 的炮孔,在巷帮施工长钻孔进行抽采作业,如图 12 所示。



(a) 回采工作面



(b) 煤巷掘进工作面

图 12 典型的深孔控制预裂爆破强化瓦斯抽采示意

Fig.12 Schematic diagram of a typical deep hole controlled pre-fracture blasting for enhanced gas extraction

深孔控制预裂爆破技术有赖于炸药爆炸做功,抽采孔起到控制孔作用,为煤体提供位移补偿和裂隙导向,从而提高煤层透气性^[75]。与松动爆破技术相比,深孔控制预裂爆破技术具备几个特点:①深孔控制预裂爆破的炮孔更长;②深孔控制预裂爆破需要控制孔辅助作业;③深孔控制预裂爆破使用散装粘性低威力的炸药^[76]。刘泽功团队围绕深孔控制预裂爆破技术在淮南潘三矿^[75, 77-78]、淮南新集一矿^[76]、皖北煤电集团卧龙湖煤矿^[79-80]等矿区开展了大量工程现场试验和应用,取得了良好的效果。此外,研究团队对深孔控制预裂爆破技术的数值模拟^[81-83]、炸药改进^[84-85]等

方面也进行了深入研究,形成了成套的施工工艺和技术装备,开始在工程上规模化利用爆破技术增透煤层,提高瓦斯抽放效率。为了增加爆破裂纹长度,减小粉碎圈半径,定向爆破增透技术被开发出来。郭德勇等^[86]对煤层深孔聚能爆破致裂机理进行了研究,并在郑州大平煤矿进行了现场验证试验,现场应用表明粉碎圈半径显著减小,用于径向裂纹扩展的能量占比提高,煤层渗透率显著提高。此后郭德勇等^[87]在深孔聚能爆破致裂增透机理的基础上对施工工艺进行进一步分析并在现场开展了应用,增透效果良好。随着技术的成熟,深孔聚能爆破致裂增透技术被越来越多地

应用在工程现场^[88-89]。除了工程现场试验以外, 众多学者还通过室内模型试验^[90-91]和数值模拟仿真^[92-93]的研究方法对定向爆破增透技术进行了深入研究, 取得了丰富的成果。自 21 世纪初期深孔控制预裂爆破技术出现以来, 煤层爆破增透技术经过近 20 a 的高速发展期, 出现了诸如聚能爆破增透技术等新型的爆破增透技术。这些新技术的出现进一步丰富了煤层爆破增透技术的内涵。

3 煤层爆破增透技术研究进展

3.1 深孔预裂爆破增透技术

一些研究人员经常把在煤层中使用的预裂爆破增透技术和岩层中使用的预裂爆破开挖技术混为一谈, 事实上, 二者具有完全不同的内涵。在岩巷爆破掘进、硐室爆破开挖过程中使用的预裂爆破技术是为了使相邻炮孔贯穿, 尽可能抑制其他方向上爆生裂纹的扩展, 从而确保围岩稳定性。而在煤层中使用的预裂爆破技术是为了尽可能增加煤层中的裂纹, 进而提高煤层的透气性, 起到强化瓦斯抽采的效果。自深孔控制预裂爆破技术被提出以来, 得到了学者的广泛关注。研究人员通过数值模拟、模型试验、工程现场试验等多种研究方法对其进行了深入研究, 取得了丰富的成果。

3.1.1 数值模拟研究

刘泽功团队较早使用数值模拟方法研究深孔控制预裂爆破对瓦斯抽采的影响。姚尚文^[75]使用 Fluent 这类 CFD 数值模拟软件, 研究了深孔控制预裂爆破后瓦斯抽采效果, 结果表明, 爆破后的煤层瓦斯抽采流量、流速均显著提高, 同时研究指出抽采孔应布置在裂隙区, 这有利于瓦斯抽采。李尧斌^[76]、张文清^[94]使用类似的数值模拟方法对不同布孔方式下的深孔控制预裂爆破进行仿真, 对比了爆破前后的区域瓦斯压力变化情况, 表明深孔控制预裂爆破能对煤块整体范围内的瓦斯流动造成影响。然而, 爆破增透煤层是一个典型的动态力学问题, CFD 软件擅长对于流体进行仿真, 但对于大变形的冲击动载问题比较欠缺。LS-DYNA 数值模拟软件对求解爆破这类大变形动态问题有着很好的效果。蔡峰等^[81]使用 Taylor 方法建立了一个新的 LS-DYNA^{3D} 爆破损伤模型, 再现了深孔预裂爆破过程中的爆生产物致裂煤层的全过程, 并分析了爆破孔间距对爆破增透效果的影响, 从理论上提出了最优爆破孔间距。刘頔^[95]使用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件对石门揭穿低透气性煤层深孔爆破增透进行仿真, 结果表明, 最佳孔间距在 2~4 m 之间。刘健^[96]对不同布孔模式下的深孔预裂爆破增

透工况进行模拟, 表明深孔预裂爆破增透技术对低透气性煤层增透效果显著。受限于计算机算力的影响, 这一阶段的数值模拟模型的网格划分较为稀疏, 模型尺寸也较小, 早期基于 LS-DYNA 开展的深孔预裂爆破数值模拟典型裂纹扩展如图 13 所示。

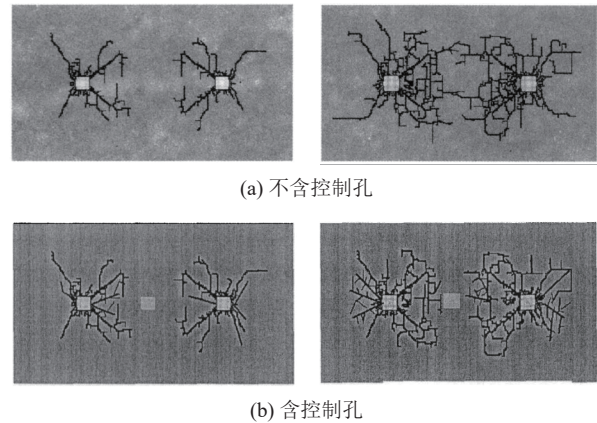


图 13 深孔预裂爆破数值模拟裂纹分布^[83, 96]

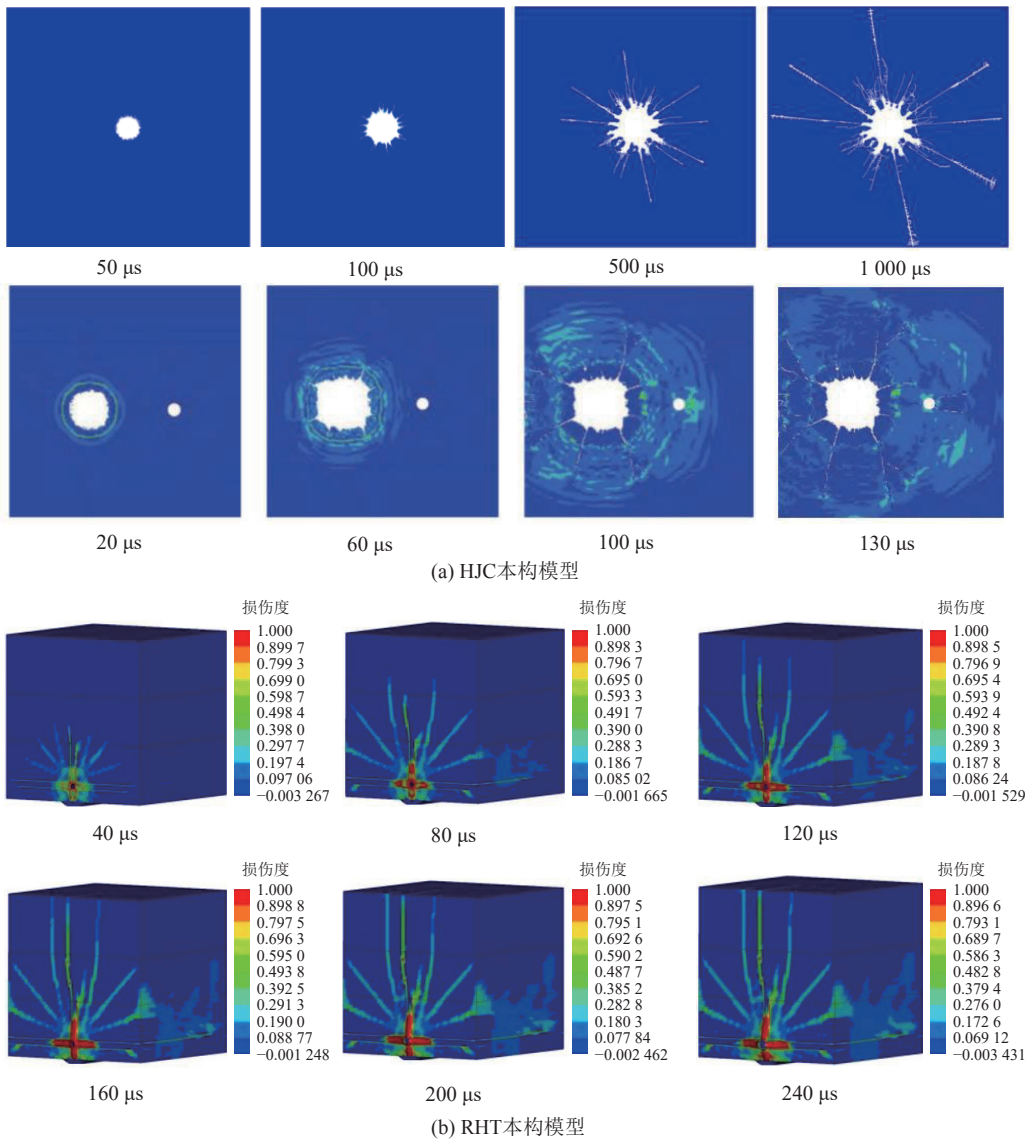
Fig.13 Numerical simulation of crack distribution by hole pre-cracking blasting^[83, 96]

随着计算机硬件的快速发展, 计算机的算力飞速提高, 基于 ANSYS/LS-DYNA 的数值仿真研究层出不穷。煤岩本构模型的正确选取是保证数值模拟结果准确性的前提, 近年来 HJC^[54, 97-98]和 RHT^[99-100]本构模型使用较多, 这 2 种模型都可以模拟爆破载荷作用下媒体高应变率和大变形下的力学特性。对于 HJC 本构模型而言, 需要通过添加 *MAT_ADD_EROSION 失效准则对爆破导致的媒体拉伸破坏裂纹进行描述, 失效的单元会被删除。而 RHT 本构模型基于 HJC 本构模型开发而来, 其考虑了偏应力张量的第三不变量, 这方面优于 HJC 本构模型。此外, RHT 本构模型还可以模拟媒体部分损伤和完全损伤状态(断裂)。然而 RHT 本构模型存在参数较多、获取困难的缺点。总而言之, 二者均存在各自优缺点。使用 HJC 本构模型和 RHT 本构模型开展的数值模拟效果如图 14 所示。

从爆破孔层位布置上来看, 一些学者开展了顶、底板岩层爆破增透数值模拟研究。此外, 很多学者开始研究爆破过程中煤、岩介质的动态响应特征^[101]以及不同工程要素(装药量、煤层埋深、孔间距、孔径大小等)对爆破增透效果的影响^[102-105], 这里不再展开讨论。

3.1.2 物理模型试验研究

相较于数值模拟研究方法, 物理模型试验方法被用于研究深孔预裂爆破的时间较晚。所谓物理模型试验研究方法就是在实验室内开展物模爆破试验, 观

图 14 HJC 和 RHT 本构模型的爆破仿真效果^[54, 98, 100]Fig.14 Blast simulation effect of HJC and RHT constitutive models^[54, 98, 100]

察模型中的宏观裂纹、应力应变等方面的演化情况。

通常来说,物理模型可以是原煤(岩)材料也可以是类煤岩材料。考虑到取材难度及信号检测等多方面因素,使用类煤岩材料开展的物理模型试验研究较多。陈磊^[106]以相似理论为基础,以淮南矿区 C13-1 煤层为试验背景开展了深孔预裂爆破相似模拟试验,试验考察了爆破过程中模型电阻率及应变信号变化情况,定性分析了爆破对煤层增透的作用。张凯^[107]同样基于相似理论开展了深孔预裂爆破穿层增透技术研究,试验对比了 3 种装药模式下的爆破效果,并得出煤-岩层界面装药爆破煤层增透效果最佳的结论。郭林杰^[108]通过相似模拟试验对应力波的构成及衰减规律进行了研究,研究表明,应力波波形包含压缩相和拉伸相,且峰值随爆心距增加减小。李庐阳^[109],王明重^[110],刘健等^[111],姜亚北^[112],张树川^[113-114]等也均通

过物理模型试验的研究方法对深孔预裂爆破增透煤层进行了研究。对众多物理模型试验的研究进行归纳总结发现:① 物理模型材料多为相似材料,岩体骨料多使用砂子,煤体骨料多使用煤粉及砂子,胶结材料多使用水泥及石膏;② 物理模型多为纯煤或煤岩组合的立方体,模型上预留有爆破孔(控制孔),内部埋设有应变砖、铜电极等信号采集传感器;③ 物理模型一般在自研加载装置内爆破,装置用来施加应力和位移约束,或提供瓦斯环境;④ 效果考察方面包括宏观裂纹扩展、动态应力应变信号、电阻率变化情况、声发射变化、损伤度变化等。典型的爆破增透物理模型试验流程如图 15 所示。

3.1.3 工程现场试验与应用

深孔预裂爆破增透技术经历几十年的发展,在煤矿工程实践上得到了广泛的应用。姚尚文^[75]在淮南

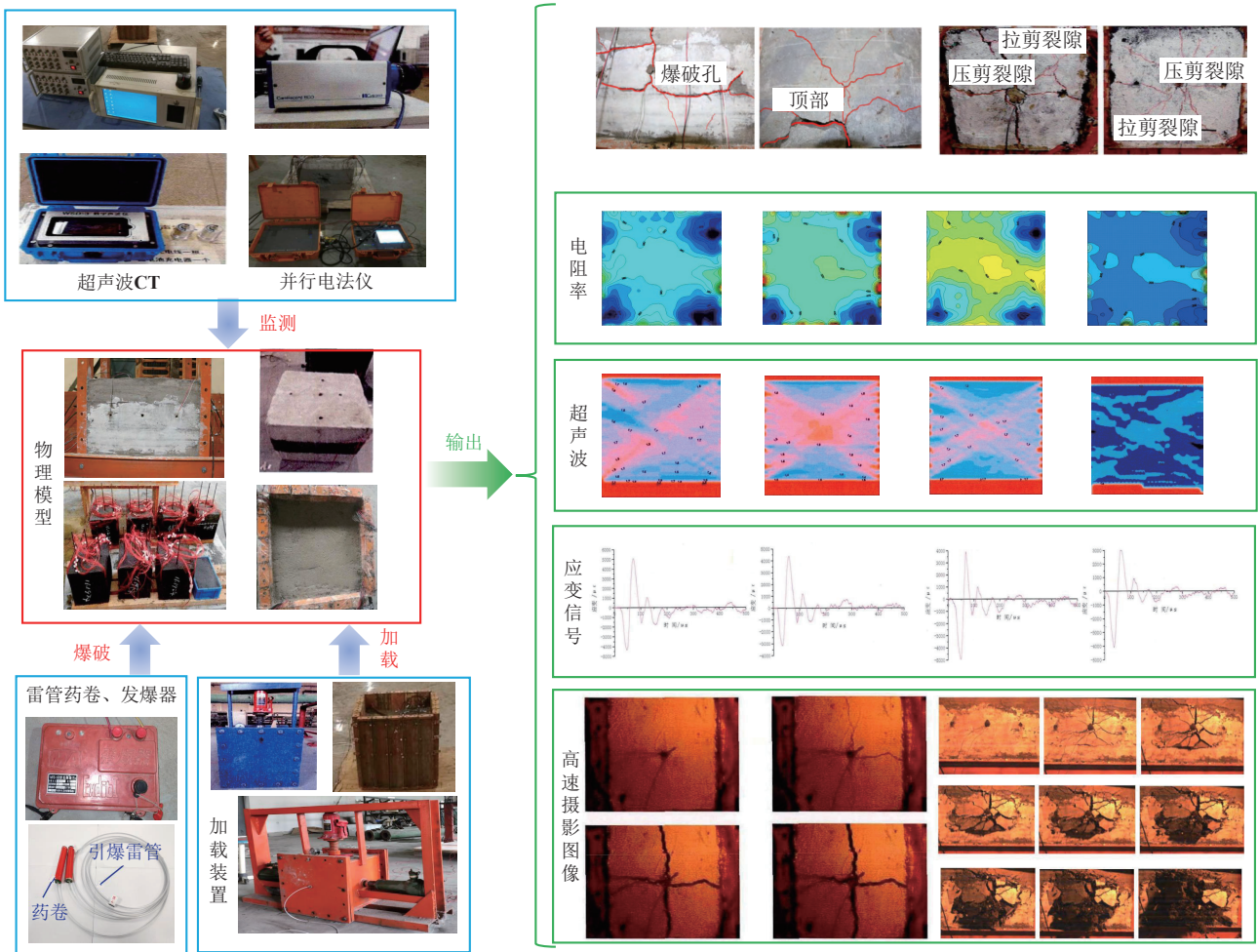


图 15 深孔预裂爆破物理模型试验典型试验流程^[111, 113, 115-117]

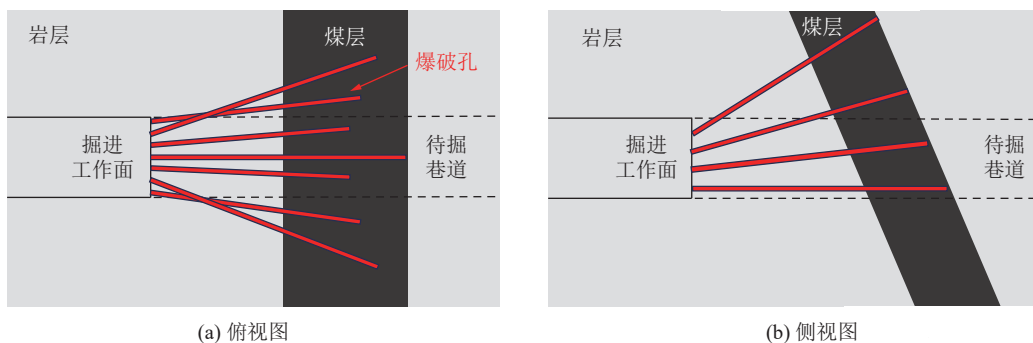
Fig. 15 Typical test procedure for physical modeling tests of deep hole pre-fracture blasting^[111, 113, 115-117]

潘三矿的 1781(3) 综采工作面利用深孔预裂爆破技术对 C13-1 煤层进行增透, 考察爆破后的瓦斯抽采浓度、混量及纯量变化情况, 效果良好。肖应祺^[118]在淮北矿业集团祁南矿 349 综采工作面使用深孔预裂爆破技术与顶板走向钻孔瓦斯抽采、老塘立孔瓦斯抽采、上隅角吸空管抽采等技术相结合, 开展了综采工作面瓦斯综合治理试验, 效果显著。张延明^[119]在九里山矿 14 采区 14121 工作面顺煤层施工 16 个爆破孔进行爆破增透, 结果表明瓦斯抽放时间显著缩短。为了解决高瓦斯、强突出煤层掘进速度慢的问题, 一些学者对利用爆破技术提高掘进速度进行了研究。刘健等^[80]在皖北煤电集团卧龙湖煤矿 103 首采工作面 103 运输巷掘进工作面利用深孔预裂爆破技术提高煤层透气性, 利用巷帮钻孔爆破增透技术强化煤层增透效果, 结果表明, 巷帮长钻孔爆破增透配合巷道边抽边掘能够有效提高高瓦斯突出煤层的巷道掘进速度并保证工作面的安全。罗勇^[120]在芝兰冲矿 14059 采区煤巷利用深孔预裂爆破技术快速消突掘进, 爆破后单孔瓦斯抽放浓度提高 20%, 掘进速度提高 1 倍。此后, 张

家文^[121], 冉永进^[122], 侯松^[123]也用该技术对煤巷快速消突掘进, 取得了良好的效果。

石门揭煤是煤与瓦斯突出的高发作业环节, 深孔预裂爆破增透技术在石门快速安全揭煤方面也得到了广泛应用。为了预防煤与瓦斯突出事故的发生, 在岩巷揭露煤层前先预先向煤层内施工钻孔, 而后进行爆破增透, 再对煤层瓦斯进行抽采。石门揭煤爆破孔布置如图 16 所示。

淮南新集一矿北中央 11 煤轨道下山揭 13 煤工作面^[76]、淮南潘一矿西翼暗副斜井揭 8 煤工作面^[124]、淮南谢一矿 W4B8 轨道下山揭 B4 煤工作面^[125]、贵州水城矿业大湾煤矿中井 2 号运输斜巷揭 11 号煤工作面^[126]等均使用深孔预裂爆破增透技术实现了石门的安全、快速揭煤。如果根据使用场景和使用目的不同对工程现场应用种类进行划分, 该技术可分为综采工作面瓦斯防治、突出煤层煤巷安全快速掘进以及石门安全快速揭煤等类型。如果根据钻孔层位分类, 又可分为顺层爆破增透和穿层爆破增透^[111-112], 这里不再展开讨论。



(a) 俯视图 (b) 侧视图

图 16 石门揭煤爆破孔布置

Fig.16 Rock cross-cut coal blasting hole layout

3.2 深孔定向爆破增透技术

2008 年, 中国矿业大学 (北京) 郭德勇等^[86]提出了煤层深孔聚能爆破致裂增透方法, 他阐述了煤层深孔聚能爆破效应以及聚能爆破煤层致裂机理, 并在郑州大平煤矿开展了工程应用, 取得了良好的效果。所谓聚能爆破致裂增透即使用聚能药卷代替普通药卷进行爆破增透。聚能药卷内部安装有金属罩, 通常为紫铜材质。炸药爆炸后产生高温高压的爆轰产物进而压垮金属罩产生金属射流, 金属射流侵入孔壁后在爆破孔壁上产生初始导向裂隙, 形成先发优势, 起到定向致裂煤层的效果。定向聚能爆破作用原理如图 17 所示。

2009 年, 郭德勇等^[87]从选址、打钻、装药、封孔、引爆 5 个部分进行阐述, 从施工工艺的角度进一步完善了煤层深孔聚能爆破致裂增透技术。另一方面, 为

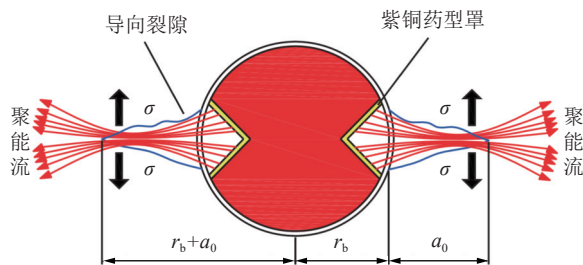
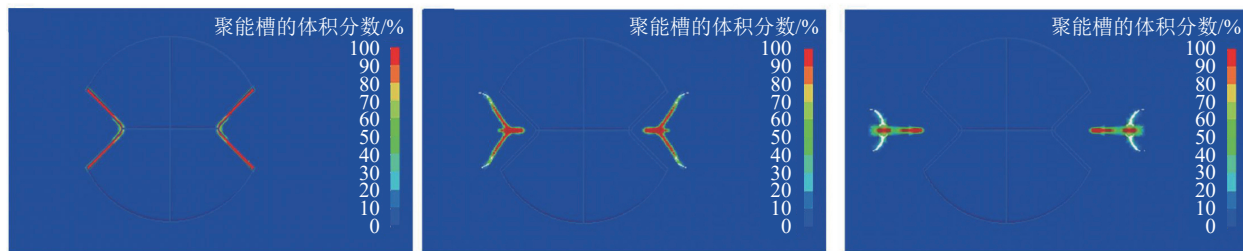


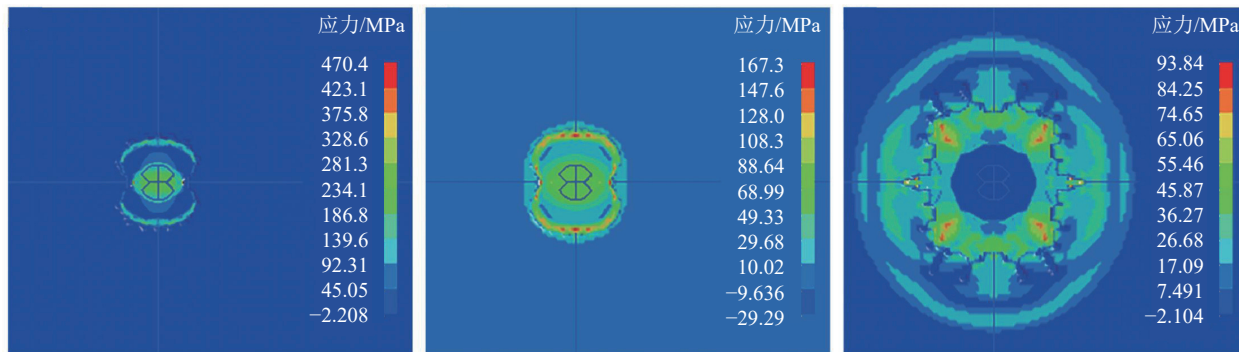
图 17 定向聚能爆破作用原理^[117]

Fig.17 The action principle of accumulative blasting^[117]

了进一步了解煤层的动态响应特征, 在现场试验的基础上, 使用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了聚能爆破作用下的煤体力学响应, 发现聚能方向上会产生较小的粉碎区和较显著的断裂^[127]。对聚能爆破动力学效应进行分析发现, 在冲击压缩作用下, 聚能槽变为聚能射流, 提高主聚能方向的能流密度 (图 18a)。由于聚能



(a) 聚能射流形成与运移



(b) 应力波传播

图 18 定向聚能爆破的聚能射流及应力波演化^[92]

Fig.18 The evolution of shaped jet and stress wave generated by accumulative blasting^[92]

槽对能量的吸收作用, 聚能方向上的应力波形成和传播滞后, 应力强度较小 (图 18b)^[92]。除了数值模拟以外^[128], 相似模拟试验也是研究聚能爆破煤层增透的重要手段^[90, 129-131]。随着煤层开采向深部转移, 地应力对聚能爆破增透的影响也得到了研究^[132]。

聚能爆破增透技术由于其致裂范围大、能量定向释放的优势在工程现场得到了推广应用。郭德勇等^[132]在平煤十矿己 15-24100 工作面、己 15-33200 工作面和十二矿己 15-33060 工作面开展不同地应力下的聚能爆破煤层增透工程应用, 爆破后炮孔 5 m 范围内的瓦斯抽采得到强化, 3 m 范围内的瓦斯体积分数和纯量增长率分别为 210.3%~482.8% 和 191.3%~427.5%。李向上等^[91]使用聚能爆破增透技术在平煤十矿己 15, 16-24130 工作面开展应用, 爆破后瓦斯体积分数从原来的 9.5% 提高到 33.2%~66.32%。傅师贵等^[133]在淮南矿区使用普通爆破和聚能爆破增透煤层, 考察距爆破孔 3.5、4.5 m 处瓦斯抽采数据发现, 相

比于普通爆破, 聚能爆破增透模式下瓦斯浓度增长量分别提高了 2.47% 和 6.42%, 聚能爆破增透范围更广。此外, 专家学者在工程现场开展了双孔聚能爆破增透^[134]、不同地应力下聚能爆破增透^[135]、多孔同段布孔模式聚能爆破增透^[136]、偏心不耦合装药模式聚能爆破增透^[137]、含控制孔的聚能爆破增透^[47], 起到了较好的煤层增透效果。不同工况下的聚能爆破增透煤层效果如图 19 所示。

除了使用聚能药卷进行爆破增透以外, 一些学者还使用切缝药包爆破以达到定向增透的目的^[138-139]。顾名思义, 切缝药包即在药包上切开 1 条或多条缝隙。在爆破时切缝方向上不存在任何阻力, 爆生产物可以对空气介质直接作用, 产生的集中能量流直接冲击炮孔壁在炮孔壁上产生一个冲击压力 P_1 。非切缝方向上, 受炸药外壳限制作用在爆破孔壁上产生的冲击压力为 P_2 , 二者的压力差会使钻孔受剪切破坏, 从而形成初始导向裂隙^[140], 如图 20 所示。

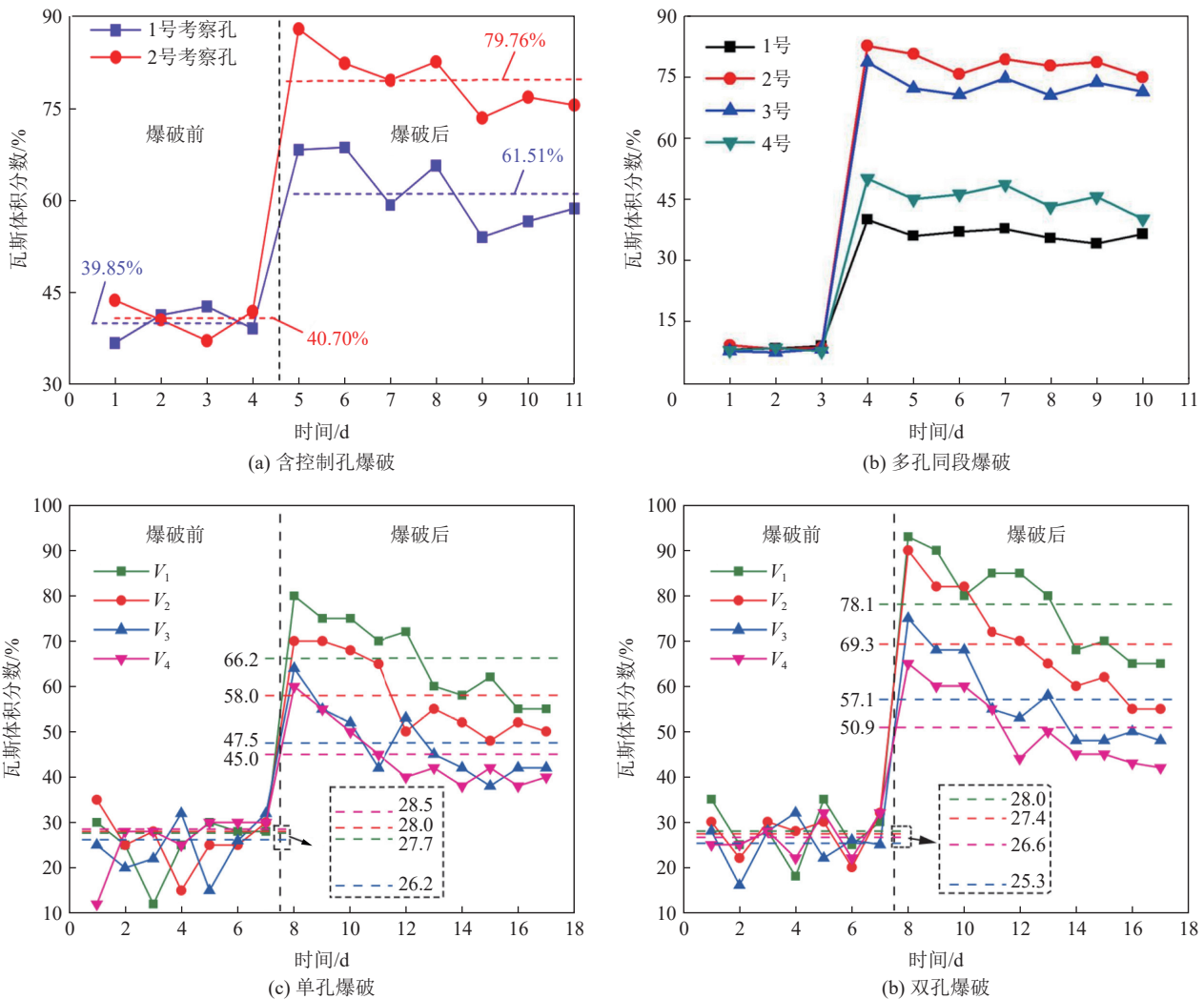


图 19 定向聚能爆破增透前后瓦斯体积分数变化^[47,134,136]

Fig.19 Change in gas volume fraction before and after cumulative blasting^[47,134,136]

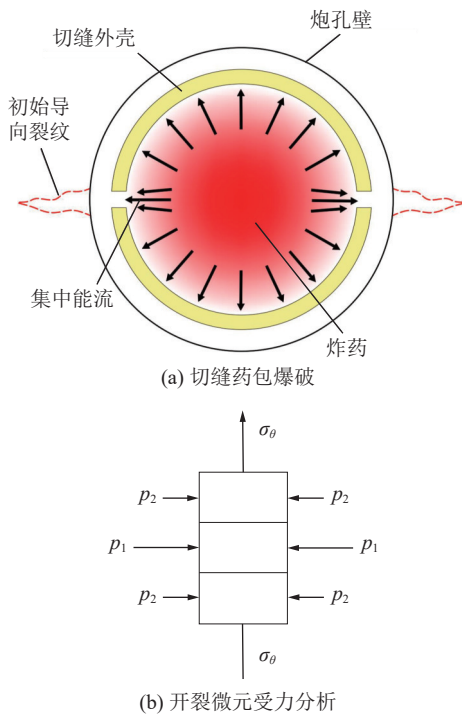


图 20 切缝药包爆破及致裂岩体原理^[140]

Fig.20 The principle of slotted cartridge blasting and fracturing rock mass

与上述聚能爆破类似，初始导向裂隙的产生使切缝方向上获得先发优势，裂纹得以定向扩展。需要说明的是，一些文献也将切缝药包爆破称为聚能爆破，为了区分，所提及的聚能爆破特指在药卷内部设置有金属聚能罩的爆破方式。切缝药包爆破和聚能爆破是通过改变药卷结构实现定向爆破增透的目的。除此以外，还可以使用改变钻孔形状的方式(切槽爆破增透)实现对煤层的定向爆破增透^[141-142]。

综上，深孔定向爆破增透技术涵盖深孔聚能爆破增透技术、切缝药包爆破增透技术以及切槽定向爆破增透技术，其中深孔聚能爆破增透技术工程现场应用最多。无论哪种定向爆破技术都是利用初始导向裂隙的先发优势实现对煤体的定向断裂。不同之处在于，聚能爆破和切缝药包爆破是利用爆炸能量率先致裂爆破孔壁，从而产生初始导向裂隙，而切槽爆破则是在装药前预先在爆破孔壁上切割初始导向裂隙。3种定向爆破增透技术各有优缺点，聚能爆破和切缝药包爆破施工工序简单，但炸药外壳制作较为复杂；切槽爆破药卷简单，然而需要增加在爆破孔壁切槽的工序。在实际工程应用中通常视具体情况选用。

3.3 其他爆破增透技术

除了上述梳理的主流爆破增透技术以外，还有一些爆破增透技术也得到了研究，如水压爆破增透技术、携砂爆破增透技术、爆破与水力压裂联合增透技

术等。对于水压爆破而言，即在炸药附近布置水袋后进行爆破增透。与空气耦合装药不同，水耦合装药能够提高爆破压力，进而提高炸药能量利用率，受到学者关注^[143-144]。携砂爆破是在炸药周围布置细沙，而后利用爆炸冲击波和爆生气体将砂子楔入爆生裂纹当中，从而避免裂纹的快速闭合延长瓦斯抽采时间^[145-146]。爆破与水力压裂联合增透技术先使用爆破工艺使煤层获得均匀的裂隙，而后使用水力压裂技术进行压裂，研究表明，相比于传统水力压裂，该技术增透效果更好^[147]。上述爆破增透技术的研究多局限于数值模拟、模型试验或小范围现场试验，目前并未得到大规模的现场推广应用。

3.4 小结

通过对文献梳理发现，从出现时间上看，深孔松动爆破增透技术出现时间最早，深孔预裂爆破增透技术次之。从工程应用现场的推广程度来看，深孔预裂爆破增透技术使用最为广泛，深孔聚能爆破增透技术次之。目前学术研究最为活跃的是深孔聚能爆破增透技术。对爆破增透技术进行分类，可分为深孔松动爆破增透技术、深孔预裂爆破增透技术、深孔定向爆破增透技术以及其他爆破增透技术。爆破增透技术具体的分类明细如图 21 所示。

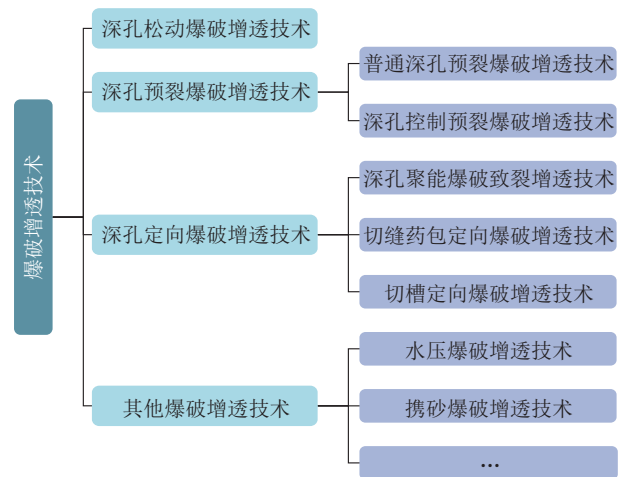


图 21 爆破增透技术分类

Fig.21 Classification of blasting antireflection technology

需要说明的是，笔者总结了利用高能炸药进行煤层爆破增透的相关研究成果，不包括二氧化碳爆破和空气爆破。炸药爆炸是一种化学反应，而空气和二氧化碳爆炸涉及物理相变现象。尽管一些二氧化碳爆破增透的研究借用了炸药爆破致裂煤岩体的理论，但实际上二者存在较大差异。炸药爆炸在钻孔壁上产生的初始压力载荷的峰前时间很短，而气体相变的载荷曲线峰前时间则相对较长，这对爆破粉碎区的形成及其范围至关重要。因此，相同峰值压力下的炸药爆

炸和二氧化碳爆炸的致裂效果也存在显著区别。气体爆破增透的正压作用时间与炸药爆破导致的正压时间的差异是导致煤岩体产生不同的动态响应的另一重要原因。

4 煤层爆破增透技术展望

学者们已经对煤层爆破增透技术的机理和工艺进行了广泛研究,取得了很多创新成果,解决了理论和技术难题,效果显著。然而,爆破增透技术存在其固有的短板,且随着开采环境的变化以及国家对安全水平要求的不断提高,对煤层爆破增透技术提出了新的要求。爆破增透震动存在诱发煤岩瓦斯动力灾害的风险,且随着煤炭开采深度和范围的增加,应力、温度和瓦斯压力也随之增大,导致煤与瓦斯耦合致灾风险上升;我国各产煤区的地质条件、构造及瓦斯分布差异明显,甚至同一矿井的不同区域也存在较大差异;爆破增透后的煤层存在裂隙闭合快、瓦斯有效抽采时间短等问题,加之随着开采深度增加,高地应力松软煤层打钻时易出现垮孔、塌孔现象;随着我国矿井向智能化转型,爆破增透技术也应积极拥抱智能矿山。鉴于此,综合煤层爆破增透技术面临的问题和未来需求,提出发展趋势和展望。

1) 精准定向爆破增透技术研究。煤厚变异区、小构造区内的构造应力复杂,在采动应力叠加下容易诱发煤岩瓦斯动力灾害,是煤与瓦斯突出高发区域。爆破扰动引起的动态应力与构造应力叠加同样存在发生煤岩动力灾害的风险。在这种情况下使用传统预裂爆破增透技术存在爆炸能量无序释放的问题,爆破震动可能会诱发煤与瓦斯突出。定向爆破增透技术能够控制爆破裂纹的定向扩展和爆生能量的定向释放,在爆破增透的同时避免扰动构造煤层。今后的研究应致力于复杂地质条件、煤层物理力学性质、瓦斯压力、瓦斯含量及构造应力分布特征等多因素耦合条件下的精准定向爆破增透技术的研究分析,开发适用于不同工况下的精准定向爆破增透工艺,从而让爆破增透技术与时俱进,适用于深部复杂环境下的煤炭开采。

2) 岩层爆破增透技术研究。我国松软低渗煤层众多,打钻时容易出现卡钻、塌孔问题。加之深部煤层受到自重引起的垂直应力与采动应力联合影响,煤层承受的应力远超其抗压强度。若在煤层中钻孔,会影响钻机设备和爆破器材的安全使用。即便在爆破增透后,松软煤层受应力挤压后裂隙易于闭合,无法对瓦斯进行长时间的高效抽采。因此,可以在顶底板岩层内开展爆破增透作业,而后利用岩层钻孔对瓦斯

进行高效抽采。然而岩层爆破增透过程中的煤岩动态响应规律仍不明确。今后的研究应当聚焦于多场耦合作用下的应力波在煤岩体内的传播规律、能量耗散与衰减规律、应变场和位移场分布规律等方向的研究。此外,也可结合深孔预裂控制爆破增透技术、精准定向爆破增透技术,对顶底板岩层爆破时的炮孔布置和装药参数、炸药起爆和封孔模式进行研究,完善岩层爆破施工工艺。

3) 爆破增透技术智能化研究。经过改革开放的创新发展,我国煤矿逐渐向智能化迈进。煤矿智能化是适应现代工业技术革命发展趋势、保障国家能源安全、实现煤炭工业高质量发展的核心技术支撑。随着矿井智能化工作的推进,对煤矿瓦斯治理也提出了智能化的要求。未来的发展方向应加强智能化技术在煤层爆破增透领域的应用。因此,有必要结合矿山煤层瓦斯自动探测和智能识别技术,开发能够根据矿井的地质及施工条件对爆破参数进行智能设计的软件系统;研究基于煤层地质条件和人工智能识别的精准爆破增透技术;在爆破过程中,对爆破震动信号、微震信号等煤岩动态响应信号进行实时监测和数据分析,及时优化调整后续施工;共建爆破增透信息共享平台,利用大数据技术对全国范围内的爆破增透信息数据进行分析,结合人工智能算法训练可提供整套煤层爆破增透技术方案的智能模型。

参考文献(References):

- [1] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究—综合卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 中华人民共和国统计局. 国家数据[DB/OL]. [2023-07-11]. <https://data.stats.gov.cn/>.
- [3] 张培森, 李复兴, 朱慧聪, 等. 2008—2020年煤矿事故统计分析及防范对策[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(1): 128-34. ZHANG Peisen, LI Fuxing, ZHU Huicong, et al. Statistical analysis and prevention countermeasures of coal mine accidents from 2008 to 2020[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(1): 128-34.
- [4] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 近20年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 134-141. ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Spatial-temporal distribution of outburst accidents from 2001 to 2020 in China and suggestions for prevention and control[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 134-141.
- [5] 196人遇难, 2022年煤矿事故详细名单公布[EB/OL]. [2023-01-23]. <https://www.mkaq.org/html/2023/01/03/654818.shtml>.
- [6] 178人遇难!2021年煤矿事故详细名单公布[EB/OL]. [2022-01-15]. <https://www.mkaq.org/html/2022/01/15/606203.shtml>.
- [7] 程远平, 俞启香. 中国煤矿区域性瓦斯治理技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 383-390.

- CHENG Yuanping, YU Qixiang. Development of regional gas control technology for Chinese coalmines[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(4): 383–390.
- [8] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1370–1379.
- YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1370–1379.
- [9] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(1): 45–49.
- YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 45–49.
- [10] XU C, YANG T, WANG K, et al. Research on the evolution law of hot spots in the field of coal seam hydraulic fracturing based on bibliometric analysis: Review from a new scientific perspective[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(37): 86618–86631.
- [11] FANG X J, WU C F, ZHANG H W, et al. Stress distribution properties and deformation–fracture mechanisms in hydraulic fracturing of coal[J]. *Fuel*, 2023, 351: 129049.
- [12] FANG X J, WU C F, GAO B, et al. Effects of active hydraulic fracturing fluid on the fracture propagation and structural damage of coal: Phenomena and mechanisms[J]. *Natural Resources Research*, 2023, 32(4): 1761–1775.
- [13] 魏国营, 郭中海, 谢伦荣, 等. 煤巷掘进水力掏槽防治煤与瓦斯突出技术[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(2): 172–176.
- WEI Guoying, GUO Zhonghai, XIE Lunrong, et al. Hydraulic slotting technology to prevent coal and gas outburst during heading excavation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(2): 172–176.
- [14] CUI J Q, HOU Y B, XIE S R, et al. Study on the effect of strain-softening on permeability and gas pressure in surrounding rocks of a hydraulic flushing borehole[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(17): 15501–15517.
- [15] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 297–322.
- WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 297–322.
- [16] QIAO Guodong, LIU Zegong, ZHANG Yongmin, et al. Theoretical analysis and engineering application of controllable shock wave technology for enhancing coalbed methane in soft and low-permeability coal seams[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 25.
- [17] LIU P, LIU A, LIU S M, et al. Experimental evaluation of ultrasound treatment induced pore structure and gas desorption behavior alterations of coal[J]. *Fuel*, 2022, 307: 121855.
- [18] LIU P, FAN L, FAN J Y, et al. Effect of water content on the induced alteration of pore morphology and gas sorption/diffusion kinetics in coal with ultrasound treatment[J]. *Fuel*, 2021, 306: 121752.
- [19] LI H, LIN B Q, YANG W, et al. Experimental study on the petro-physical variation of different rank coals with microwave treatment[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 154: 82–91.
- [20] SHI Y, LIN B Q, LIU T, et al. Synergistic ECBM extraction technology and engineering application based on hydraulic flushing combing gas injection displacement in low permeability coal seams[J]. *Fuel*, 2022, 318: 123688.
- [21] CAI J W, YANG S Q, HU X C, et al. Risk assessment of dynamic disasters induced by gas injection displacement in coal seams[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 128: 41–49.
- [22] BALUCAN R D, TURNER L G, STEEL K M. Acid-induced mineral alteration and its influence on the permeability and compressibility of coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 973–987.
- [23] JI H J, LI Z H, PENG Y J, et al. Pore structures and methane sorption characteristics of coal after extraction with tetrahydrofuran[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 19: 287–294.
- [24] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 爆破载荷作用下高地应力巷道 PPV 衰减规律研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(23): 260–266, 283.
- QIAO Guodong, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Attenuation law of PPV in high crustal stress tunnels under blasting load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(23): 260–266, 283.
- [25] 张奇. 岩石爆破的粉碎区及其空腔膨胀[J]. *爆炸与冲击*, 1990, 10(1): 68–75.
- ZHANG Qi. Smash districts and expanding of cavities in rock blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1990, 10(1): 68–75.
- [26] QIAO Guodong, LIU Zegong, YI Changping, et al. Quantitative assessment of the effect of *in situ* stresses on blast-induced damage to rock[J]. *Computers & Structures*, 2023, 287: 107116.
- [27] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 爆破震动作用下高地应力巷道动力响应特征与稳定性研究[J]. *振动工程学报*, 2024, 37(3): 414–422.
- QIAO Guodong, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Characteristics and stability of dynamic response of a high in-situ stress roadway under blasting vibration[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2024, 37(3): 414–422.
- [28] FOURNEY W L, DICK R D, WANG X J, et al. Fragmentation mechanism in crater blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(4): 413–429.
- [29] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1971, 8(3): 181–202.
- [30] MCHUGH S. Crack extension caused by internal gas pressure compared with extension caused by tensile stress[J]. *International Journal of Fracture*, 1983, 21(3): 163–176.
- [31] BHANDARI S. On the role of stress waves and quasi-static gas pressure in rock fragmentation by blasting[M]. *Gasdynamics of explosions and reactive systems*. Amsterdam: Elsevier, 1980: 365–383.
- [32] PAINE A S, PLEASE C P. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting: Some analytical results[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &*

- Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 699–706.
- [33] WAN X S, ZHANG W W, DENG K, et al. Shale gas completion fracturing technology based on FAE controlled burning explosion[J]. *Energy*, 2024, 296: 130941.
- [34] DAEHNKE A, ROSSMANITH H P, NAPIER J A L. Gas pressurisation of blast-induced conical cracks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3-4): 263. e1-263. e17.
- [35] SONG Y, LIU T, WANG M, et al. Desorption of CH₄/CO₂ from kerogen during explosive fracturing[J]. *Fuel*, 2022, 324: 124741.
- [36] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1411–1478.
- [37] IL'YUSHIN A. A. The mechanics of a continuous medium[M]. Moscow: Izd-vo MGU, 1971.
- [38] VOVK A A, MIKHALYUK A V, BELINSKII I V. Development of fracture zones in rocks during camouflet blasting[J]. *Soviet Mining*, 1973, 9(4): 383–387.
- [39] SZULADZINSKI G. Response of rock medium to explosive borehole pressure[A]. Proceedings of the International symposium on rock fragmentation by blasting (Fragblast-4)[C]. Rotterdam: Balkema, 1993: 17–23.
- [40] DJORDJEVIC N. Two-component of blast fragmentation[A]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast (Fragblast-6)[C]. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 1999: 213–222.
- [41] KANCHIBOTLA Seshadri, VALERY Walter, MORRELL Stephen. Modeling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding[A]. Proceedings of Explo'99, Kalgoorlie[C]. Kalgoorlie: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1999: 137–44.
- [42] 宗琦, 田立, 汪海波. 水介质不耦合装药爆破岩石破坏范围的研究和应用[J]. *爆破*, 2012, 29(2): 42–46.
ZONG Qi, TIAN Li, WANG Haibo. Study and application on rock damage range by blasting with water-decoupled charge[J]. *Blasting*, 2012, 29(2): 42–46.
- [43] 高尔新, 杨仁树. 工程爆破[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
GAO Erxin, YANG Renshu. *Blasting engineering*[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [44] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [45] 宗琦. 炮孔柱状装药爆破时岩石破碎和破裂的理论探讨[J]. *矿冶工程*, 2004, 24(4): 1–3.
ZONG Qi. Theoretical analysis of mechanism of rock fragmentation in column charge blasting[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, 24(4): 1–3.
- [46] PERSSON P A, HOLMBERG R, LEE J. Explosives[M]. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton: CRC Press, 2018: 55–86.
- [47] 郭德勇, 赵杰超, 张超, 等. 煤层深孔聚能爆破控制孔作用机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 919–930.
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, ZHANG Chao, et al. Mechanism of control hole on coal crack initiation and propagation under deep-hole cumulative blasting in coal seam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 919–930.
- [48] 李会良, 邢昭芳. 深孔控制卸压爆破机理和防突试验[J]. *煤矿安全*, 1990, 21(10): 1–8, 35.
LI Huiliang, XING Zhaofang. Deep-hole controlled unloading blasting mechanism and anti-raiding tests[J]. *Safety in Coal Mines*, 1990, 21(10): 1–8, 35.
- [49] 赵杰超. 煤层深孔聚能爆破致裂增透机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
ZHAO Jiechao. Splitting mechanism of deep-hole cumulative blasting with linear-shaped charge in coal seam[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2021.
- [50] YI C P, JOHANSSON D, GREBERG J. Effects of *in situ* stresses on the fracturing of rock by blasting[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 104: 321–330.
- [51] TAO J, YANG X G, LI H T, et al. Effects of *in situ* stresses on dynamic rock responses under blast loading[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 145: 103374.
- [52] LI X H, ZHU Z M, WANG M, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 113: 103968.
- [53] BRADY B H G. Rock mechanics for underground mining[M]. London: Allen & Unwin, 1985.
- [54] 张鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 89–100.
ZHANG xin, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Study on the propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 89–100.
- [55] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high *in situ* stresses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 19–33.
- [56] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 966–975.
- [57] LI X D, LIU K W, QIU T, et al. Study of presplit blasting under high *in situ* stress[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 288: 109360.
- [58] 四川矿业学院. 国外煤和瓦斯突出机理综述[J]. *川煤科技*, 1976(S1): 1–19.
COLLEGE Sichuan Mining. A review of coal and gas outburst mechanisms abroad[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 1976(S1): 1–19.
- [59] 四川矿业学院. 国外研究煤和瓦斯突出近况[J]. *川煤科技*, 1973(S1): 43–59.
COLLEGE Sichuan Mining. Overseas research on coal and gas outbursts[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 1973(S1): 43–59.
- [60] 王海东. 深部开采低渗透煤层预裂控制爆破增透机理研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
WANG Haidong. Study on the mechanism of enhancing permeability of high stressed and low permeable coal seam in deep mining

- by pre-splitting controlled blasting technology[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012.
- [61] 重庆煤炭科学研究所. 国内外防治煤和瓦斯突出措施的现状和动态[J]. 矿业安全与环保, 1976(3): 30-48.
INSTITUTE Chongqing Coal Science. Current status and dynamics of measures to prevent and control coal and gas outbursts at home and abroad[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1976(3): 30-48.
- [62] 陈锐. 煤和瓦斯突出防治技术讲座 第五讲 突出预防措施[J]. 煤炭工程师, 1989, 16(1): 5-26.
CHEN Rui. Lecture on prevention and control technology of coal and gas outburst lecture 5: Outburst prevention measures[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1989, 16(1): 5-26.
- [63] 瞿涛宝. 试论深孔松动爆破防止突出的效果[J]. 煤矿安全, 1986, 17(11): 42-47.
QU Taobao. Discussion on the effect of preventing outburst by deep hole loose blasting[J]. Safety in Coal Mines, 1986, 17(11): 42-47.
- [64] 白赞成. 略论深孔松动爆破防止突出[J]. 中州煤炭, 1990, 12(1): 36-38.
BAI Zancheng. Brief discussion on prevention of outburst by deep hole loose blasting[J]. Zhongzhou Coal, 1990, 12(1): 36-38.
- [65] 李济堂. 深孔松动爆破在防治煤与瓦斯突出中的应用[J]. 煤矿安全, 1991, 22(11): 1-7.
LI Jitang. Application of deep-hole loose blasting in prevention and control of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 1991, 22(11): 1-7.
- [66] 邢昭芳, 阎永利, 李会良. 深孔控制卸压爆破防突机理和效果考察[J]. 煤炭学报, 1991, 16(2): 1-9.
XING Zhaofang, YAN Yongli, LI Huiliang. Mechanism and results of prevention of rockburst by controlled pressure relief deep holes[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(2): 1-9.
- [67] 林柏泉. 深孔控制卸压爆破及其防突作用机理的实验研究[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1995(3): 16-21.
LIN Baiquan. The research on outburst preventive mechanism of controlling stress relaxation blast in deep borehold of coal tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 1995(3): 16-21.
- [68] 罗勇, 沈兆武. 深孔控制卸压爆破机理和防突试验研究[J]. 力学季刊, 2006, 27(3): 469-475.
LUO Yong, SHEN Zhaowu. Study on mechanism and test of controlled stress relaxation blasting in deep hole[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(3): 469-475.
- [69] 赵宝友, 王海东. 深埋突出煤层深孔控制爆破致裂机理和防突效果研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(10): 47-54.
ZHAO Baoyou, WANG Haidong. Cracking mechanism of deeply buried coal seam by long-hole controlled blasting and coal-gas outbursts prevention[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(10): 47-54.
- [70] 刘泽功. 煤矿抽放瓦斯技术现状及展望[J]. 中国煤炭, 2000, 26(8): 12-14.
LIU Zegong. The current status and prospects of coal mine gas extraction technology[J]. China Coal, 2000, 26(8): 12-14.
- [71] 王佰顺, 戴广龙, 童云飞, 等. 深孔松动爆破提高瓦斯抽放率的应用研究[J]. 煤矿安全, 2002, 33(11): 5-7.
WANG Baishun, DAI Guanglong, TONG Yunfei, et al. Applied study on deep hole standing shot to improve methane drainage efficiency[J]. Safety in Coal Mines, 2002, 33(11): 5-7.
- [72] 宋贤生, 戴广龙, 童云飞, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔松动增透爆破研究[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(2): 1-2, 5.
SONG Xiansheng, DAI Guanglong, TONG Yunfei, et al. Research on deep hole loose penetration increasing blasting in high gas and low permeability coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2003, 30(2): 1-2, 5.
- [73] 戴广龙, 宋贤生, 童云飞, 等. 掘进工作面深孔松动预裂爆破卸压增透的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2003, 34(12): 23-25.
DAI Guanglong, SONG Xiansheng, TONG Yunfei, et al. Numerical simulation of pressure relief and permeability enhancement by deep hole loose presplitting blasting in heading face[J]. Safety in Coal Mines, 2003, 34(12): 23-25.
- [74] 颜事龙, 刘泽功, 黄文尧, 等. 煤矿瓦斯抽采爆破药柱: CN201476709U[P]. 20100519232001.
- [75] 姚尚文. 高瓦斯低透气性煤层强化增透抽放瓦斯技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2005.
YAO Shangwen. Study on the technology of increasing drainage in high gas and low air permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2005.
- [76] 李尧斌. 高瓦斯煤层深孔控制预裂爆破增透技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006.
LI Yaobin. Study on the technology of long-hole pre-splitting blast controlling in high gas coal seam to increase permeability[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2006.
- [77] 姚尚文, 刘泽功, 杨立新. 高瓦斯掘进工作面抽放瓦斯技术[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(5): 1-4.
YAO Shangwen, LIU Zegong, YANG Lixin. Gas drainage technology for high gassy gateway heading face[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(5): 1-4.
- [78] 刘健, 刘泽功, 石必明. 低透气性突出煤层巷道快速掘进的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 827-831.
LIU Jian, LIU Zegong, SHI Biming. Study on the roadway excavation rapidly in the low permeability outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 827-831.
- [79] 刘健, 刘泽功, 石必明, 等. 深孔预裂控制爆破技术在低透气性煤层巷道掘进中的应用研究[J]. 建井技术, 2008, 29(3): 28-30, 40.
LIU Jian, LIU Zegong, SHI Biming, et al. Research on the application of deep hole pre-cracking controlled blasting technology in low permeability coal seam roadway boring[J]. Mine Construction Technology, 2008, 29(3): 28-30, 40.
- [80] 刘健, 刘泽功, 石必明, 等. 突出煤层快速掘进深孔预裂爆破预抽瓦斯技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(8): 45-48.
LIU Jian, LIU Zegong, SHI Biming, et al. Technology of gas pre-drainage with deep borehole pre-cracking blasting for gateway rapid excavation in seam with outburst[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(8): 45-48.
- [81] 蔡峰, 刘泽功, 张朝举, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增

- 透数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(5): 499-503.
- CAI Feng, LIU Zegong, ZHANG Chaoju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5): 499-503.
- [82] 刘泽功, 张春华, 刘健, 等. 低透气煤层预裂瓦斯运移数值模拟及抽采试验[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 29(4): 17-21.
- LIU Zegong, ZHANG Chunhua, LIU Jian, et al. Numerical simulation of gas migration in pre-splitting coal seam with low permeability and experiment of gas extraction[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 29(4): 17-21.
- [83] 蔡峰, 刘泽功, 林柏泉. 高瓦斯煤层深孔预裂爆破增透数值模拟试验[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(4): 513-516.
- CAI Feng, LIU Zegong, LIN Boquan. Numerical simulation on increase of permeability using deep-hole pre-splitting explosion in coal seam[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2009, 28(4): 513-516.
- [84] 刘泽功, 何家林, 吴红波, 等. 高密度高爆速水胶炸药震源药柱及其制备方法[P]. 中国专利: CN102432409B, 2013-09-11.
- [85] 刘泽功, 颜事龙, 傅菊根, 等. 一种带有防滑机构的爆破药柱: CN202853507U[P]. 20130403232001.
- [86] 郭德勇, 裴海波, 宋建成, 等. 煤层深孔聚能爆破致裂增透机理研究[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(12): 1381-1385.
- GUO Deyong, PEI Haibo, SONG Jiancheng, et al. Study on splitting mechanism of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1381-1385.
- [87] 郭德勇, 宋文健, 李中州, 等. 煤层深孔聚能爆破致裂增透工艺研究[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(8): 1086-1089.
- GUO Deyong, SONG Wenjian, LI Zhongzhou, et al. Research on splitting technical of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(8): 1086-1089.
- [88] 郭志强, 齐文国, 李宗远, 等. 穿层钻孔深孔聚能爆破增透试验效果分析[J]. *中州煤炭*, 2009(6): 13-14, 84.
- GUO Zhiqiang, QI Wenguo, LI Zongyuan, et al. Effects analysis on deep-hole cumulative blasting permeability-increase experiments in bores through rock and coal seam[J]. *Zhongzhou Coal*, 2009(6): 13-14, 84.
- [89] 商登莹, 吕鹏飞, 于学洋, 等. 低透气性煤层深孔聚能爆破增透技术及实践[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(12): 48-51.
- SHANG Dengying, LV Pengfei, YU Xueyang, et al. Permeability improved technology and practices with deep borehole energy accumulation blasting in low permeability seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(12): 48-51.
- [90] 穆朝民, 王海露, 黄文尧, 等. 高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制[J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2496-500.
- MU Chaomin, WANG Hailu, HUANG Wenyao, et al. Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2496-500.
- [91] 李向上, 郑俊杰, 宋彦琦, 等. 高瓦斯低透气性煤层聚能爆破增透机制[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(5): 158-170.
- LI Xiangshang, ZHENG Junjie, SONG Yanqi, et al. On infiltration enhancement mechanism of shaped charge blasting in high gas and low permeability coal seam[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(5): 158-170.
- [92] 郭德勇, 赵杰超, 吕鹏飞, 等. 煤层深孔聚能爆破动力效应分析与应用[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(12): 1681-1687.
- GUO Deyong, ZHAO Jiechao, LV Pengfei, et al. Dynamic effects of deep-hole cumulative blasting in coal seam and its application[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(12): 1681-1687.
- [93] 齐杰杰, 赵允信, 周新华, 等. 装药位置对深孔聚能爆破数值模拟与应用研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(11): 33-38.
- QI Jingjie, ZHAO Youxin, ZHOU Xinhua, et al. Study on numerical simulation and application of deep-hole cumulative blasting under effect of charging positions[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(11): 33-38.
- [94] 张文清. 回采工作面边采边抽瓦斯抽放技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006.
- ZHANG Wenqing. Study on technology of gas draining while mining in working-face[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2006.
- [95] 刘岷. 石门揭穿低透气性煤层深孔爆破增透技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2008.
- LIU Di. Study on uncovering low permeable coal seam through cross cut by deep-hole blasting technology to increase permeability of coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2008.
- [96] 刘健. 低透气煤层深孔预裂爆破增透技术研究及应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2008.
- LIU Jian. Technic study on increasing permeability of deep-hole presplitting blasting and its application in low permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2008.
- [97] 杨帅, 刘泽功, 张健玉, 等. 柱状聚能药管聚能罩角度对煤层爆破增透效果试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 129-138.
- YANG Shuai, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Experimental study on the effect of the angle of the shaped charge tube on the penetration enhancement of coal seam blasting[J]. *Coal Science and Technology* 2024, 52(3): 129-138.
- [98] 张先跃, 高魁, 周云权, 等. 瓦斯抽采钻孔对爆生裂隙扩展规律影响的试验研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(8): 119-123.
- ZHANG Xianyue, GAO Kui, ZHOU Yunquan, et al. Experiment on influence of gas extraction drilling on propagation of blast-induced fissures[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(8): 119-123.
- [99] ZHANG J Y, LIU Z G, FU S G, et al. Damage of rock mass by double-hole blasting with slit charge and development of stress wave under high *in situ* stress[J]. *Shock and Vibration*, 2022, 2022: 6967057.
- [100] 高魁, 王秘, 乔国栋, 等. 松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(6): 102-110.
- GAO Kui, WANG Mi, QIAO Guodong, et al. Simulation test re-

- search and application of blasting and penetration improvement in the soft coal seam floor[J]. *Coal Science and Technology* 2024, 52(6): 102–110.
- [101] 孟杰. 丁集矿底板穿层深孔预裂爆破增透试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
MENG Jie. Experimental study of long-hole pre-splitting blast through strata in floor gateway to increase permeability of the DINGJI coal mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2013.
- [102] 徐向宇, 姚邦华, 魏建平, 等. 煤层预裂爆破应力波传播规律及增透机理模拟研究[J]. *爆破*, 2016, 33(2): 32–38.
XU Xiangyu, YAO Banghua, WEI Jianping, et al. Numerical study of stress wave propagation behavior and permeability-increasing mechanism of pre-splitting blasting in coal seam[J]. *Blasting*, 2016, 33(2): 32–38.
- [103] 吕昌, 刘健, 郭林杰. 深孔预裂爆破不同孔间距下裂隙演化规律[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(11): 65–68.
LYU Chang, LIU Jian, GUO Linjie. Evolution laws of cracks under different hole pitch in deep hole pre-splitting blasting[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(11): 65–68.
- [104] 蔡峰. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破强化增透效应研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009.
CAI Feng. Study on effect of intensified increasing permeability by deep-hole presplitting blasting in high gas and low permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2009.
- [105] ZHAO D, WANG M Y, GAO X H. Study on the technology of enhancing permeability by deep hole presplitting blasting in Sanyuan coal mine[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20353.
- [106] 陈磊. 深孔预裂爆破煤层增透相似模拟实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
CHEN Lei. Simulation experiments study on permeability improvement technology of deep hole pre-splitting blasting[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014.
- [107] 张凯. 深孔预裂爆破穿层增透装药技术的实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
ZHANG Kai. Experimental research on the charge technology for cross strata antireflective deep-hole pre-splitting blasting[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014.
- [108] 郭林杰. 顾南矿揭 C13-1 煤层深孔预裂爆破卸压增透技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
GUO Linjie. Study on permeability improvement and release of pressure technology of deep hole pre-splitting blasting in 11-3 Coal uncovering of guqiao south coal mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.
- [109] 李庐阳. 深孔预裂爆破增透技术在正行矿煤巷掘进中的应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
LI Luyang. Application study of deep borehole pre-fracturing blasting enhancing permeability technology to seam opening in Zhenghang mine coal roadway driving[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.
- [110] 王明重. 底板穿层钻孔预裂爆破煤层增透模拟试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
WANG Mingzhong. Simulation experiments study on permeability improvement technology of presplitting blasting through floor cross-measure boreholes[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.
- [111] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 不同装药模式爆破载荷作用下煤层裂隙扩展特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 735–742.
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study of extension characters of cracks in coal seam under blasting load with different charging modes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 735–742.
- [112] 娄亚北. 赵固二矿二₁ 煤穿层深孔松动爆破卸压增透应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
LOU Yabei. Application study of deep borehole loose blasting through strata in the Two₁ coal seam of No. 2 coal mine of zhaogu[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016.
- [113] 张树川. 爆破作用下煤体损伤和裂隙演化多因素影响机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
ZHANG Shuchuan. Study on the multi-factor influence mechanism of coal damage and crack evolution under the blasting[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [114] 张树川, 刘泽功, 刘健, 等. 爆破载荷作用下控制孔增透作用机理试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(24): 213–219, 249.
ZHANG Shuchuan, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Tests for control hole's enhanced permeability mechanism under blasting load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(24): 213–219, 249.
- [115] 李汉坤. 不同耦合系数及孔间距对煤层爆生裂隙扩展影响的试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
LI Hankun. Experimental study on the influence of different coupling coefficient and hole spacing on the fracture propagation of coal seam detonation[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [116] 左云飞. 潘三矿 C13 煤层爆破增透相似模拟试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
ZUO Yunfei. Simulation test of blasting permeability improvement of C13 coal seam in pansan mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [117] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 综掘工作面过硬岩正断层爆破方式优选实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(3): 507–516.
QIAO Guodong, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study on optimum blasting method of crossing hard rock normal fault in fully mechanized mining face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(3): 507–516.
- [118] 肖应祺. 祁南矿 3₂ 煤层深孔爆破增透技术的研究及应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2008.
XIAO Yingqi. Research and application of deep-hole blasting anti-reflection technique in 3₂ coal seam of qi-Nan coal mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2008.
- [119] 张延明. 低透气煤层深孔爆破预裂增透技术实践[J]. *中州煤炭*, 2010, (10): 11–13.
ZHANG Yanming. Practice on permeability-increasing technology by deep boreholes pre-split blasting technology in low permeabil-

- ity coal seams[J]. 2010, (10): 11–13.
- [120] 罗勇. 芝兰冲矿煤巷工作面快速掘进技术的试验探索[J]. 采矿技术, 2010, 10(S1): 130–131.
LUO Yong. Experimental exploration of rapid digging technology for coal mine working face in chilanchong mine[J]. Mining Technology, 2010, 10(S1): 130–131.
- [121] 张家文. 掘进工作面深孔预裂爆破技术应用分析[J]. 世界有色金属, 2018(21): 145–146.
ZHANG Jiawen. Application and analysis of deep hole pre-splitting blasting technology in driving face[J]. World Nonferrous Metals, 2018(21): 145–146.
- [122] 冉永进. 煤巷掘进爆破致裂增透高效消突技术实践[J]. 江西煤炭科技, 2020(3): 25–27, 32.
RAN Yongjin. Practice on efficient outburst control technology with blast cracking and anti-reflection[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2020(3): 25–27, 32.
- [123] 侯松. 高吸附低透气性煤层掘进巷道瓦斯治理技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
HOU Song. Research on gas control technology of drivage roadway in high adsorption and low permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [124] 杨伟, 凌志强. 深孔爆破增透瓦斯抽采技术在石门揭煤中的应用[J]. 科技创新导报, 2007(35): 94–96.
YANG Wei, LING Zhiqiang. Application of deep hole blasting penetration-enhancing gas extraction technology in Shimen coal uncovering[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2007(35): 94–96.
- [125] 刘林. 深孔预裂爆破技术在石门揭煤中的应用[J]. 能源技术与管理, 2009(3): 49–50.
LIU Lin. Application of deep hole pre-cracking blasting technology in Shimen coal uncovering[J]. Energy Technology and Management, 2009(3): 49–50.
- [126] 邓川. 深孔预裂爆破增透技术在石门揭煤中的应用[J]. 煤炭技术, 2019, 38(10): 102–104.
DENG Chuan. Application of permeability improvement technology of deep borehole pre-cracking blasting in seam opening of cross-cut[J]. Coal Technology, 2019, 38(10): 102–104.
- [127] 郭德勇, 吕鹏飞, 裴海波, 等. 煤层深孔聚能爆破裂隙扩展数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 274–278.
GUO Deyong, LV Pengfei, PEI Haibo, et al. Numerical simulation on crack propagation of coal bed deep-hole cumulative blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 274–278.
- [128] ZHAO D, SHEN Z Y, LI M H, et al. Study on parameter optimization of deep hole cumulative blasting in low permeability coal seams[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 5126.
- [129] 张鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 高瓦斯低渗煤层控制孔与定向控制爆破复合作用增透试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 2018–2027.
ZHANG Xin, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Experimental study on permeability enhancement by combined action of control hole and directional control blasting in high gas and low permeability coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 2018–2027.
- [130] ZHU F H, LIU Z G, ZUO Y F, et al. Damage and failure characteristics of coal and surrounding rock under shaped blasting[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 176: 56–64.
- [131] ZHU F H, LIU Z G, HUANG A C. The shaped blasting experimental study on damage and crack evolution of high stress coal seam[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: 105030.
- [132] 郭德勇, 张超, 朱同功. 地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透的作用[J]. 工程科学学报, 2022, 44(11): 1832–1843.
GUO Deyong, ZHANG Chao, ZHU Tonggong. Effect of in-situ stress on the cracking and permeability enhancement in coal seams by deep-hole cumulative blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(11): 1832–1843.
- [133] 傅师贵, 刘泽功, 常帅, 等. 深井高瓦斯低渗煤层深孔聚能爆破增透试验研究[J]. 煤炭科学技术: 1–13. [2024–5–17], <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240616.1235.003>
FU Shigui, LIU Zegong, CHANG Shuai, et al. Research on Deep Hole Convergence Energy Blasting for Increasing Permeability in Deep Wells with High Gas and Low Permeability Coal Seams[J]. Coal Science and Technology: 1–13. [2024–5–17] <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240616.1235.003>
- [134] 郭德勇, 赵杰超, 朱同功, 等. 双孔聚能爆破煤层裂隙扩展贯通机理[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1613–1623.
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, ZHU Tonggong, et al. Crack propagation and coalescence mechanism of double-hole cumulative blasting in coal seam[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1613–1623.
- [135] 张超. 煤层深孔聚能爆破致裂增透影响因素及作用机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
ZHANG Chao. Study on influencing factors and mechanism of deep hole cumulative blasting in coal seam[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2022.
- [136] 李向上. 聚能爆破致裂机理及其影响因素研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
LI Xiangshang. Splitting mechanism and influencing factors of the cumulative blasting[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2021.
- [137] 郭德勇, 张超, 朱同功, 等. 装药结构对煤层深孔聚能爆破增透的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1488–1494.
GUO Deyong, ZHANG Chao, ZHU Tonggong, et al. Effect of charge structure on deep-hole cumulative blasting to improve coal seam permeability[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(12): 1488–1494.
- [138] 黄凯. 低透气性煤层切缝药包预裂爆破最优切缝宽度实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
HUANG Kai. Experimental study on pre-splitting blasting optimum slit width of split-tube charge holder in low air permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [139] 陈响升, 刘泽功, 乔国栋, 等. 含控制孔切缝药柱爆破增透松软煤层数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(12): 29–33.
CHEN Xiangsheng, LIU Zegong, QIAO Guodong, et al. Numerical simulation on blasting anti-reflection of soft coal seam with con-

- trol hole and slit seam column[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12): 29–33.
- [140] 乔国栋, 刘泽功, 高魁, 等. 切缝药包超前预裂爆破厚硬顶板矿压与瓦斯综合防治试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 334–345, 376.
QIAO Guodong, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study on the control of mine pressure and gas governance in thick and hard roof by pre-blasting of slotted cartridge[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 334–345, 376.
- [141] 乔国栋, 高魁, 郑明亮, 等. 含控制孔切槽爆破的裂隙扩展机制研究[J]. 工程爆破, 2020, 26(2): 24–31.
QIAO Guodong, GAO Kui, ZHENG Mingliang, et al. Study on crack propagation mechanism of grooving blasting with controlled hole[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 24–31.
- [142] 郑明亮. 低透气性煤层切槽控制爆破损伤机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
ZHENG Mingliang. Study on similar simulation test of chute controlled blasting in low permeability coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [143] 蔡峰, 刘泽功. 水不耦合装药对深孔预裂爆破应力波能量的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(8): 16–21.
CAI Feng, LIU Zegong. Impact of water decoupling charging on the energy of stress waves generated by blast in the process of deep-hole presplit blast in coal-bed[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(8): 16–21.
- [144] 夏彬伟, 刘承伟, 卢义玉, 等. 缝槽水压爆破导向裂隙扩展实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 432–438.
XIA Binwei, LIU Chengwei, LU Yiyu, et al. Experimental study of propagation of directional fracture with slotting hydraulic blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 432–438.
- [145] 高新宇. 低透气高瓦斯煤层聚能携砂爆破裂隙演化试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
GAO Xinyu. Experimental study on the evolution of cumulative sand-carrying blasting fractures in coal seams with low permeability and high gas content[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [146] 沈海. 固粒支撑剂在煤层爆破裂隙中的运移堆积规律[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
SHEN Hai. Migration and accumulation law of solid particle proppant in coal seam blasting fracture[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [147] YANG Wei, LU Changzheng, SI Guangyao, et al. Coal and gas outburst control using uniform hydraulic fracturing by distress blasting and water-driven gas release[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 79: 103360.